

Sveučilište u Zagrebu  
**Fakultet strojarstva i brodogradnje**

# **DIPLOMSKI RAD**

Aleksandar Pašić

**Zagreb, 2015.**

Sveučilište u Zagrebu  
**Fakultet strojarstva i brodogradnje**

# **DIPLOMSKI RAD**

**Mentor:**

Dr.sc. Ivo Džijan

Aleksandar Pašić

**Zagreb, 2015.**





SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: Aleksandar Pašić

Mat. br.: 0067353028

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj razmaka između vodećeg i pratećeg automobila na koeficijente aerodinamičkih sila**

Naslov rada na engleskom jeziku: **The influence of the distance between leading and trailing car on aerodynamic coefficients**

Opis zadatka:

Kod natjecateljskih automobila se radi poboljšavanja dinamičkih svojstava automobila ugrađuju različiti dodatni aerodinamički elementi. Vožnja pratećeg automobila iza vodećeg pri relativno malim razmacima tijekom utrke, odnosno unutar aerodinamičkog traga vodećeg automobila, zbog tih dodatnih elemenata značajno utječe na aerodinamičke sile otpora i uzgona pratećeg i vodećeg automobila, a time i na njihova dinamička svojstva.

U diplomskom radu treba, uz pomoć programskog paketa FLUENT, numerički simulirati opstrujavanje pojednostavljenih modela dvaju automobila klase FIA GT pri stacionarnom pravocrtном gibanju jednog iza drugoga pri različitim razmacima automobila. Pri tome treba koristiti model trodimenzijskog turbulentnog strujanja nestlačivog fluida. Na temelju rezultata simulacije treba analizirati zavisnost koeficijenata aerodinamičkih sila otpora i uzgona vodećeg i pratećeg automobila od međusobnog razmaka automobila.

Rad treba sadržavati:

1. Uvod s prikazom dosadašnjih eksperimentalnih i numeričkih istraživanja u ovom području.
2. Opis modela turbulentnog strujanja nestlačivog fluida, te metode konačnih volumena.
3. Postavke numeričke simulacije gibanja vodećeg i pratećeg automobila po cesti.
4. Rezultate numeričke simulacije.
5. Diskusiju rezultata, te zaključke.

Rezultate proračuna prikazati odgovarajućim tablicama, dijagramima i slikama.

U radu treba navesti literaturu i eventualno dobivenu pomoć tijekom izrade.

Zadatak zadan:

7. svibnja 2015.

Rok predaje rada:

9. srpnja 2015.

Predviđeni datumi obrane:

15., 16. i 17. srpnja 2015.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Ivo Džijan

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

# Izjava

Izjavljujem da sam rad izradio samostalno koristeći navedenu literaturu i znanje stečeno tijekom studija.

Ovom prilikom se također želim zahvaliti mentoru dr. sc. Ivi Džijanu na savjetima, konzultacijama i pomoći koju mi je pružio tijekom izrade rada.

# Sadržaj

Sadržaj .....	i
Popis slika .....	iii
Popis tabela .....	vii
Popis oznaka .....	viii
Sažetak.....	1
Summary.....	2
<b>1 Uvod .....</b>	<b>3</b>
1.1 Problem trkaćih vozila .....	3
1.2 Problem cestovnog transporta/prometa .....	4
<b>2 Literatura na temu trkaćih vozila .....</b>	<b>6</b>
2.1 Promjena tehničkih pravila vezanih uz aerodinamiku Formula 1 bolidu od 2009. godine nadalje [3]. .....	6
2.3 BAR Honda F1 i Advantage CFD [4] .....	18
2.5 European Late Model Series [4] .....	23
<b>3 Literatura na temu komercijalnih cestovnih vozila .....</b>	<b>27</b>
3.1 Götz (1983.) .....	27
3.2 Azim i Gawad (2000.) .....	27
3.3 Tsuei i Savas (2001.) .....	30
3.4 Zabat et. al. (1994.) .....	31
3.5 Watkins i Vino (2004.) .....	32
3.6 Rajamani, Watkins, Vino, Pagliarella (2006.) .....	33
3.7 Rajamani (2006.) .....	35
3.7.1 Vodeće vozilo .....	35
3.7.2 Prateće vozilo .....	37
<b>4 Aerodinamika vozila .....</b>	<b>40</b>
4.1 Aerodinamika i karakteristike strujanja .....	41
4.1.1 Viskozno i neviskozno strujanje .....	41
4.1.2 Laminarno i turbulentno strujanje .....	42
4.1.3 Stlačivo, nestlačivo strujanje i Machov broj .....	43
4.2 Aerodinamičke sile i momenti .....	46
<b>5 Računalna dinamika fluida .....</b>	<b>50</b>
5.1 Problemi računalne dinamike fluida .....	50
5.2 RANS jednadžbe za viskozno nestlačivo turbulentno strujanje .....	52
5.3 Modeli turbulencije .....	54
5.3.1 Ostvarivi $k - \varepsilon$ model .....	56
5.4 Zidne funkcije .....	57
5.5 Metoda konačnih volumena .....	62
<b>6 Validacija postavki numeričke simulacije .....</b>	<b>64</b>
6.1 Diskretizacija čvrstih stijenki mreže za Ahmedovo tijelo .....	70
6.2 Izrada površinske mreže Ahmedovog tijela .....	71
6.3 Izrada prostorne mreže Ahmedovog tijela .....	76

6.4	Izrada prostorne mreže tunela za samostalno Ahmedovo tijelo .....	79
6.5	Spajanje mreža Ahmedovog tijela i tunela .....	82
6.6	Izrada tunela za dva Ahmedova tijela.....	83
6.7	Postavke numeričke simulacije Ahmedovih tijela .....	83
6.7.1	Rubni uvjeti.....	84
6.7.2	Materijal.....	86
6.7.3	Tehnika rješavanja .....	87
6.8	Strukture strujanja u aerodinamičkom tragu Ahmedovog tijela.....	91
6.9	Rezultati numeričke simulacije samostalnog Ahmedovog tijela .....	94
6.10	Rezultati numeričke simulacije dvaju Ahmedovih tijela.....	100
6.10.1	Vodeći model - otpor .....	101
6.10.2	Vodeći model - uzgon .....	105
6.10.3	Prateći model - otpor .....	108
6.10.4	Prateći model - uzgon.....	111
<b>7</b>	<b>Numerička simulacija opstrujavanja GT vozila.....</b>	<b>114</b>
7.1	Uvod u problematiku simulacije .....	114
7.2	Pojednostavljenja geometrije FZR modela .....	117
7.3	Krilo.....	119
7.3.1	NASA LS(1)-0413 aeroprofil .....	120
7.3.2	FIA "Le Mans" Grand Tourisme Endurance 2015. ....	121
7.3.3	Gurney zakrilce.....	123
7.4	Postavke numeričke simulacije .....	123
7.4.1	Dimenzije domene.....	124
7.4.2	Rubni uvjeti.....	124
7.5	Diskretizacijska mreža za FZR model .....	125
7.6	Tehnika rješavanja.....	128
7.7	Rezultati numeričke simulacije samostalnog FZR modela bez krila .....	128
7.8	Rezultati numeričke simulacije samostalnog FZR modela s krilom .....	132
7.9	Rezultati numeričke simulacije dvaju FZR modela pri međusobnim razmacima $0.125 \leq x / L \leq 4$ .....	138
7.9.1	Otpor .....	139
7.9.2	Uzgon .....	140
7.9.3	Raspodjela uzgona.....	140
7.9.4	Slučaj maksimalnog otpora i pada negativnog uzgona pratećeg vozila .....	142
7.9.5	Slučaj minimalnog otpora pratećeg vozila .....	147
<b>8</b>	<b>Zaključak i preporuke .....</b>	<b>149</b>
<b>9</b>	<b>Literatura.....</b>	<b>150</b>

## Popis slika

Slika 1. FGITS i vožnja u kolonama (PATH, 1997.) .....	5
Slika 2. Detalj mreže konačnih elemenata na prednjem dijelu bolid iz 2007. godine .....	8
Slika 3. Konture statičkog tlaka na vodeći (gornji) i prateći (donji) bolid iz 2007. god..	10
Slika 4. Konture statičkog tlaka na vodeći (gornji) i prateći (donji) bolid iz 2009. god..	13
Slika 5. Konture brzine strujanja na ravninama simetrije bolid (i domene) za bolide iz 2007. (gore) i 2009. (dolje) godine.....	15
Slika 6. Konture brzine strujanja na ravninama koje prolaze sredinom prednjih kotača za bolide iz 2007. (gore) i 2009. (dolje) godine.....	16
Slika 7. Konture brzine strujanja 1 m (lijevo) i 4.5 m (desno) iza vodećeg bolid za bolide iz 2007. (lijevo) i 2009. (desno) godine.....	17
Slika 8. Geometrija bolid BAR Honde korištena pri ispitivanju .....	18
Slika 9. Postotna promjena veličina na prateći bolid u odnosu na samostalni bolid.....	19
Slika 10. Postotna promjena veličina na vodeći bolid u odnosu na samostalni bolid.....	20
Slika 11. Raspodjela brzine strujanja u ravnini simetrije bolid pri $x / L = 1$ , m/s .....	20
Slika 12. Strujnice na prednjem kraju vodećeg i pratećeg bolid.....	21
Slika 13. Raspodjela razlike koeficijenta tlaka na gornjim i donjim površinama pratećeg bolid .....	21
Slika 14. Raspodjela razlike koeficijenta tlaka na gornjim i donjim površinama vodećeg bolid .....	22
Slika 15. Ispitivanje utjecaja međusobnog razmaka SCSA automobila u MIRA zračnom tunelu .....	23
Slika 16. Postotak promjene veličina u ovisnosti o udaljenosti između odbojnika .....	24
Slika 17. Vizualizacija strujanja pri $Re \approx 6000$ s razmakom $x = L$ .....	28
Slika 18. Vizualizacija strujanja pri $Re \approx 11000$ s razmakom $x = L$ .....	28
Slika 19. Vizualizacija strujanja pri $Re \approx 6000$ s razmakom $x = L / 2$ .....	29
Slika 20. Vizualizacija strujanja pri $Re \approx 11000$ s razmakom $x = L / 2$ .....	29
Slika 21. Vizualizacija strujanja pri $Re \approx 8000$ s razmakom $x = L / 3$ .....	29
Slika 22. Vizualizacija strujanja pri $Re \approx 11000$ s razmakom $x = L / 3$ .....	30
Slika 23. Konfiguracija konvoja i pokretnog modela prema Tsuei i Savas (2001.).....	30
Slika 24. Promjena koeficijenta sile otpora za dva mini-kombija na malim razmacima	32
Slika 25. Utjecaji međusobnog razmaka vozila na koeficijente otpora zraka.....	32
Slika 26. Postav eksperimenta u RMIT IZT.....	33
Slika 27. Utjecaj promjene međusobnog razmaka Ahmedovih modela na koeficijent otpora zraka vodećeg modela .....	34
Slika 28. Utjecaj međusobnog razmaka vozila na $C_d$ vodećeg vozila .....	36

Slika 29. Udaranje strujanja u prateći model i povrat tlaka vodećeg modela pri $x / L = 0.25$ .....	37
Slika 30. Utjecaj međusobnog razmaka vozila na $C_D$ pratećeg vozila .....	38
Slika 31. Putanje čestica fluida u laminarnom i turbulentnom režimu strujanja .....	42
Slika 32. Rezultantna aerodinamička sila i njezine komponente .....	47
Slika 33. Trenutno polje brzine i osrednjeno polje brzine.....	51
Slika 34. Veza između osrednjene i pulsirajuće komponente brzine .....	53
Slika 35. Turbulentni granični sloj kod nastrujavanja na ravnu ploču.....	61
Slika 36. Diskretizacijske mreže uz čvrstu stijenku pri primjeni zidnih funkcija (lijevo) i pri primjeni posebnog modela turbulencije (desno).....	61
Slika 37. Ahmedovo referentno tijelo.....	65
Slika 38. Dimenzije zračnog tunela u mm i neki rubni uvjeti za simulaciju samostalnog modela.....	67
Slika 39. Dimenzije računalne domene u mm za slučaj $x / L = 0.125$ .....	67
Slika 40. Dimenzije računalne domene u mm za slučaj $x / L = 4$ .....	68
Slika 41. Dio ukupne domene nazvan tunel za izolirano vozilo .....	69
Slika 42. Metoda procjene karakteristične veličine elemenata površinske mreže za ciljani $y^+$ .....	71
Slika 43. Površinska mreža Ahmedovog tijela izrađena od elemenata prosječne veličine 8 mm .....	74
Slika 44. Progušćenje mreže na nozi Ahmedovog tijela .....	75
Slika 45. Progušćenje mreže na prijelaznom rubu stražnje kosine Ahmedovog tijela .....	75
Slika 46. Lijevo - loš prijelaz prizmatskih elemenata u tetraedre; Desno - dobar i blag rast elemenata u graničnome sloju .....	76
Slika 47. Ravnina simetrije hexacore mreže Ahmedovog tijela .....	78
Slika 48. Detalj hibridne prostorne mreže na prijelaznom rubu stražnje kosine Ahmedovog tijela .....	79
Slika 49. Detalj mreže Ahmedovog tijela na dodiru noge i tla .....	79
Slika 50. Struktura blokova korištena za samostalno Ahmedovo tijelo .....	80
Slika 51. Prikaz ravnine simetrije tunela za samostalno tijelo u ICEM CFD-u .....	81
Slika 52. Spojena mreža samostalnog Ahmedovog tijela u tunelu .....	82
Slika 53. Raspodjela kvalitete elemenata mreže samostalnog Ahmedovog tijela .....	82
Slika 54. Faktori rasta između dvaju Ahmedovih tijela za sve tunele.....	83
Slika 55. Ovisnost koeficijenta otpora o kutu nagiba stražnje kosine Ahmedovog tijela. 91	
Slika 56. Strukture strujanja iza Ahmedovog tijela (kut kosine $30^\circ$ ) prema Ahmed et al. ....	92
Slika 57. Strukture strujanja iza Ahmedovog tijela (kut kosine $30^\circ$ ) prema Vino et al. . 93	
Slika 58. Raspodjela $y^+$ na samostalnom Ahmedovom tijelu .....	94
Slika 59. Shematski i simulirani prikaz struktura toka u tragu vozila .....	95

Slika 60. Konture raspodjele $C_p$ na samostalnom Ahmedovom tijelu.....	96
Slika 61. Konture raspodjele brzine u ravnini simetrije Ahmedovog tijela .....	96
Slika 62. Usporedba kontura raspodjele $C_p$ u pozadini tijela s rezultatima Ahmed et al. .....	97
Slika 63. Konture i vektori raspodjele brzine na mjestima a, b i c iza Ahmedovog tijela (25° kut nagiba kosine) prema eksperimentu i numeričkoj simulaciji .....	98
Slika 64. Konture raspodjele brzine strujanja na mjestima $x / L = 0.125, 0.25, 0.5, 0.75, 1.5$ i $2$ iza Ahmedovog tijela (30° kut nagiba kosine).....	98
Slika 65. Raspodjela koeficijenta uzgona na prednji i stražnji oslonac tijela .....	100
Slika 66. Ovisnost koeficijenta otpora vodećeg modela o međusobnom razmaku.....	101
Slika 67. Strujanje u pozadini samostalnog Ahmedovog tijela .....	102
Slika 68. Pogled sprijeda na strujanje u pozadini vodećeg modela pri $x / L = 0.25$ .....	102
Slika 69. Pogled straga na strujanje u pozadini Ahmedovih tijela pri $x / L = 0.25$ .....	103
Slika 70. Raspodjela koeficijenta tlaka na stražnjim površinama modela pri $x / L = 0.25$ .....	103
Slika 71. Strujanje u pozadini vodećeg modela pri $x / L = 2$ .....	104
Slika 72. Strujanje u ravnini simetrije pri $x / L = 2$ .....	105
Slika 73. Ovisnost koeficijenta uzgona vodećeg modela o međusobnom razmaku modela .....	106
Slika 74. Raspodjela koeficijenta uzgona na prednji i stražnji oslonac tijela pri $x / L = 0.25$ i $2$ .....	107
Slika 75. Ovisnost koeficijenta otpora pratećeg modela o međusobnom razmaku.....	108
Slika 76. Interakcija strujanja vodećeg modela s prednjim dijelom pratećeg modela pri $x / L = 0.25$ .....	109
Slika 77. Eksperimentalni postav za ispitivanje draftinga u RMIT University zračnom tunelu .....	110
Slika 78. Ovisnost koeficijenta uzgona pratećeg modela o međusobnom razmaku.....	111
Slika 79. Interakcija strujanja vodećeg modela s prednjim dijelom pratećeg modela pri $x / L = 0.125$ .....	112
Slika 80. Raspodjela koeficijenta uzgona na prednji i stražnji oslonac tijela pri $x / L = 0.125$ .....	113
Slika 81. Nacrtni i bokocrti pogled FZR modela vozila s relevantnim dimenzijama ....	116
Slika 82. Pojednostavljenja geometrije prednjeg dijela modela .....	117
Slika 83. Pojednostavljenja geometrije srednjeg dijela modela.....	118
Slika 84. Pojednostavljenja geometrije stražnjeg dijela modela .....	118
Slika 85. Koordinatni sustavi i sile aeroprofila za negativni uzgon .....	120
Slika 86. FIA pravilo vezano za Gurney zakrilce .....	122
Slika 87. Krilo za FZR model prema FIA tehničkom pravilniku .....	122
Slika 88. Princip rada Gurney zakrilca .....	123

Slika 89. Dimenzije simetričnih domena u mm za samostalni model te modele s razmakom $x / L = 4$ .....	124
Slika 90. Prikaz mreže FZR modela.....	125
Slika 91. Detalj mreže stražnjeg kotača .....	126
Slika 92. Presjek volumenske mreže oko krila FZR modela .....	126
Slika 93. Detalji mreže donjih površina krila .....	127
Slika 94. Detalji mreže gornjih površina krila.....	127
Slika 95. Progušćenje mreže u područjima vrtloga Gurney zakrilca .....	128
Slika 96. Raspodjela $y^+$ na FZR modelu .....	129
Slika 97. Raspodjela bezdimenzijskog koeficijenta tlaka $C_p$ na FZR modelu .....	129
Slika 98. Strujanje u ravnini simetrije aerodinamičkog traga FZR modela .....	130
Slika 99. Površinske strujnice na stražnjim stranicama FZR modela .....	131
Slika 100. Strujnice s polazištem na stražnjim stranicama FZR modela .....	131
Slika 101. Strujnice s polazištem na središnjem dijelu FZR modela .....	131
Slika 102. Raspodjela $y^+$ na FZR modelu s ugrađenim krilom.....	132
Slika 103. Raspodjela $y^+$ na stražnjem krilu FZR modela .....	133
Slika 104. Struktura strujanja u blizini Gurney zakrilca .....	133
Slika 105. Površinske strujnice i strujnice u ravnini simetrije FZR modela s krilom .....	134
Slika 106. Vrtložni trak FZR modela u prisustvu krila .....	134
Slika 107. Odvajanje rotirajućih vrtloga s bočnih rubova krila.....	135
Slika 108. Usporedba aerodinamičkih tragova FZR modela bez krila i s krilom .....	135
Slika 109. Dijagram raspodjele koeficijenta tlaka po simetrali vozila .....	136
Slika 110. Ovisnost koeficijenta otpora o međusobnom razmaku vozila .....	139
Slika 111. Ovisnost koeficijenta uzgona o međusobnom razmaku vozila .....	140
Slika 112. Ovisnost koeficijenta uzgona sprijeda i straga za vodeći model .....	141
Slika 113. Ovisnost koeficijenta uzgona sprijeda i straga za prateći model .....	141
Slika 114. Strujnice brzine u ravnini simetrije za $x / L = 1$ .....	143
Slika 115. Strujnice s polazištem na stražnjem dijelu vodećeg vozila .....	143
Slika 116. Dodatne strujnice brzine s polazištem na krilu vodećeg modela .....	144
Slika 117. Pogled sprijeda s dodatnim strujnicama s prednjeg odbojnika pratećeg modela .....	144
Slika 118. Raspodjela sile otpora po površinama vozila za samostalno i prateće vozilo pri $x / L = 1$ .....	145
Slika 119. Konture koeficijenta tlaka na podnicama vozila .....	145
Slika 120. Strujnice brzine sa svih površina vodećeg modela .....	146
Slika 121. Konture koeficijenta tlaka na krilu vodećeg (gore) i pratećeg (dolje) modela.....	146
Slika 122. Strujnice brzine u ravnini simetrije pri $x / L = 0.25$ .....	147
Slika 123. Izvor napajanja krila pratećeg vozila.....	147
Slika 124. Raspodjela koeficijenta tlaka u ravnini simetrija krila .....	148



## Popis tabela

Tabela 1. Utjecaj <i>draftinga</i> na F1 bolid iz 2007. godine.....	11
Tabela 2. Usporedba tehničkih pravila za 2007. i 2009. godinu .....	12
Tabela 3. Utjecaj <i>draftinga</i> na F1 bolid iz 2009. godine.....	14
Tabela 4. Gubitak performansi za glavne aerodinamičke komponente pratećeg bolida ..	14
Tabela 5. Vrijednosti $C_p$ u ovisnosti o brzini strujanja.....	49
Tabela 6. Rubni uvjet ulazne brzine .....	84
Tabela 7. Rubni uvjeti tlaka na izlazu .....	85
Tabela 8. Faktori podrelaksacije za slučajeve strujanja oko Ahmedovog tijela .....	87
Tabela 9. Sheme prostornih diskretizacija veličina .....	89
Tabela 10. Rezultati eksperimenata i simulacije izoliranog Ahmedovog tijela (kut kosine $30^\circ$ ).....	94
Tabela 11. Sudionici otpora oblika Ahmedovog tijela kuta nagiba stražnje kosine $30^\circ$ ...	99
Tabela 12. Usporedno izvješće o koeficijentima otpora samostalnog i vodećeg modela pri $x / L = 0.25$ .....	104
Tabela 13. Usporedno izvješće o koeficijentima otpora samostalnog i vodećeg modela pri $x / L = 2$ .....	105
Tabela 14. Usporedno izvješće o koef. otpora samostalnog i vodećeg modela pri $x / L = 0.25$ i $2$ .....	107
Tabela 15. Usporedno izvješće o koeficijentima otpora samostalnog i pratećeg modela pri $x / L = 0.25$ .....	109
Tabela 16. Usporedno izvješće o koef. uzgona samostalnog i pratećeg modela pri $x / L = 0.125$ .....	113
Tabela 17. Faktori podrelaksacije za slučajeve FZR modela.....	128
Tabela 18. Koeficijenti aerodinamičkih sila na FZR model bez krila.....	129
Tabela 19. Usporedno izvješće o silama uzgona podnica FZR modela s i bez krila .....	136
Tabela 20. Koeficijenti aerodinamičkih sila na FZR model s krilom.....	137

## Popis oznaka

Oznaka	Fizikalna veličina	Mjerna jedinica (SI)
$A$	referentna površina	$\text{m}^2$
$C_D$	bezdimenzijski koeficijent otpora	-
$C_L$	bezdimenzijski koeficijent uzgona	-
$C_{L,f}$	koeficijent uzgona prednje osovine	-
$C_{L,r}$	koeficijent uzgona stražnje osovine	-
$C_M$	bezdimenzijski koeficijent momenta	-
$C_p$	bezdimenzijski koeficijent tlaka	-
$D$	aerodinamička sila otpora	N
$\bar{k}$	kinetička energija turbulencije	$\text{m}^2/\text{s}^2$
$l$	karakteristična duljina	m
$l_t$	karakteristična duljina turbulencije	m
$L$	aerodinamička sila uzgona	N
$M$	aerodinamički moment	Nm
Ma	Machov broj	-
$p$	tlak	Pa
$\bar{p}$	vremenski osrednjena vrijednost tlaka	Pa
$p'$	pulsirajući dio tlaka	Pa
$R$	rezultantna aerodinamička sila	N
Re	Reynoldsov broj	-
$u_i$	polje brzine	m/s
$\bar{u}_i$	osrednjena vrijednost brzine	m/s
$u'_i$	pulsirajući dio brzine	m/s

$u^+$	bezdimenzijska brzina paralelna sa zidom	-
$v$	lokalna brzina strujanja	m/s
$v_\infty$	neporemećena brzina strujanja	m/s
$v_t$	karakteristična brzina turbulencije	m/s
$y$	normalna udaljenost od zida	m
$y^+$	bezdimenzijska udaljenost težišta prvog konačnog volumena od zida	-
$X$	uzdužna sila na aeroprofil	N
$Z$	normalna sila na aeroprofil	N
$a_\infty$	brzina zvuka u fluidu	m/s
$\beta$	faktor smanjenja presjeka zračnog tunela	%
$\bar{\varepsilon}$	brzina disipacije kin. en. turbulencije	m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup>
$\lambda$	duljina slobodnog puta molekule	m
$\mu$	dinamička viskoznost fluida	Pa · s
$\mu_t$	koeficijent turbulentne viskoznosti	Pa · s
$\nu$	kinematička viskoznost fluida	m <sup>2</sup> /s
$\tau$	smično naprezanje	Pa
$\tau_{ij}$	tenzor Reynoldsovog naprezanja	Pa
$\omega_k$	kutna brzina kotača vozila	rad/s

## Sažetak

Pri gibanju automobila aerodinamičke sile otpora i uzgona te njihova raspodjela mijenjaju se u ovisnosti o više parametara jedan od kojih je i prisutnost drugih automobila u neposrednoj blizini. Posebnu pozornost ovoj situaciji treba posvetiti kod natjecateljskih automobila koji na sebi imaju dodatne aerodinamičke elemente u svrhu poboljšanja dinamičkih svojstava. Spomenuti aerodinamički elementi relativno su osjetljivi na karakteristike nailazećeg strujanja te su podložni odvajanjima i zastoјima strujanja te gubicima efikasnosti kada se nađu u aerodinamičkom vrtložnom tragu vozila ispred. U ovom radu istražena je ovisnost aerodinamičkih sila otpora i uzgona u ovisnosti o međusobnom razmaku između pojednostavljenih modela vodećeg i pratećeg automobila klase LM GTE (prethodno FIA GT2). Uz pomoć programskog paketa ANSYS FLUENT numerički je simulirano nestlačivo viskozno opstrujavanje zraka oko automobila, pri čemu je variran međusobni razmak  $x$  u odnosu na duljinu vozila  $L$  od  $x / L = 0.125$  do 4. Na temelju rezultata dobivena je zavisnost koeficijenata aerodinamičkih sila otpora i uzgona za simulaciju vožnje automobila tijekom utrke. Dobiveni rezultati potvrđuju neke od pretpostavki o ponašanju sile otpora i uzgona u ovisnosti o međusobnom razmaku vozila.

## Summary

Aerodynamic forces of drag and lift and their distribution are subject to change depending on many parameters, one of which is the proximity of other vehicles. Special attention should be paid to this effect when considering racing cars which carry additional aerodynamic elements which aid their performance. Aforementioned aerodynamic elements are sensitive to the characteristics of the oncoming flow and are prone to flow separation, stall and loss of efficiency when subjected to a disturbed flow field behind a leading vehicle. The dependency of aerodynamics forces of drag and lift on inter-vehicle spacing of a simplified LM GTE class vehicle (formerly FIA GT2) was examined in this thesis. ANSYS FLUENT was used for the numerical simulation of an incompressible viscous flow around the vehicles, while the inter-vehicle spacing  $x$  was varied based on the vehicle length  $L$  between  $x / L = 0.125$  and 4. Dependence of aerodynamic forces of drag and lift on inter-vehicle spacing was obtained based on the results of the numerical simulation. Obtained results confirm some of the assumptions about the drag and lift force behavior at changing inter-vehicle spacing.

# 1 Uvod

## 1.1 Problem trkaćih vozila

Poznato je da se sa smanjivanjem udaljenosti između dvaju (trkaćih) vozila sila otpora oba vozila smanjuje, što je povoljno. Isto tako, pri kretanju dvaju vozila jednog iza drugog dolazi do smanjenja sile negativnog uzgona pratećeg vozila što ima nepovoljne posljedice za stabilnost vozila i njegove performanse u zavojima. Ova zavisnost daleko je izraženija kod jednosjeda s otvorenim kotačima te prednjim i stražnjim krilom (poput bolida Formule 1 i sl.) nego kod trkaćih automobila konvencionalnog (cestovnog) oblika. Razlog ovome jest osjetljivost aeroprofila prednjeg i stražnjeg krila na karakteristike struje zraka koja na njih nastrojava. Ako se krilo nalazi u relativno „čistom“ zraku bez puno turbulencije, strujanje oko samog krila biti će ujednačeno i zalijepljeno za stijenu. Pošto se krila kod trkaćih automobila koriste pri napadnim kutovima pri kojima se dobiva maksimalni negativni uzgon, čak i najmanje povećanje turbulentnosti zraka kroz koji se krilo kreće može uzrokovati slom strujanja (engl. *stall*) te drastično utjecati na stabilnost i performanse vozila. Primjer situacije u kojoj se ovakva pojava događa jest bliska vožnja dvaju trkaćih bolida jednog iza drugoga pri čemu se prednje krilo pratećeg vozila nalazi u aerodinamičkom tragu vodećeg vozila. Prateće vozilo u tom trenutku gubi znatan postotak negativnog uzgona na prednjem krilu te se centar tlaka pomiče prema stražnjoj osovini što pak dovodi do podupravljanja ako se situacija događa neposredno pred zavojem. Ovaj slučaj vrlo je čest pošto se većina manevara preticanja događa upravo na krajevima ravnih predjela trkaćih staza pred samim ulazima u zavoje.

Također, pri pravilno dimenzioniranim sustavima hlađenja trkaćih vozila javlja se problem s praćenjem automobila na maloj udaljenosti na dulje vrijeme zbog pregrijavanja motora pratećeg vozila koje se nalazi u polju sniženog tlaka i smanjene brzine nastrojavanja zraka na izmjenjivače što smanjuje njihovu efikasnost. Također,

uobičajena pozicija izlaznog otvora ispušnog sustava obično rezultira time da se u aerodinamičkom tragu vozila nalazi znatna koncentracija produkata izgaranja te polje povišene temperature. Ako uzmemo u obzir da se situacije preticanja trkaćih vozila odvijaju pri maksimalnom opterećenju motora i visokom broju okretaja, te da je faktor pretička zraka u tim trenucima ispod idealnog stehiometrijskog omjera od 1 ( $\lambda = 0,75 - 0,90$ ), u aerodinamičkom tragu vozila se uz produkte izgaranja nalazi i znatna količina neizgorjelog goriva. Utjecaj na prateći automobil ima za posljedicu smanjenje snage zbog manjka čistog zraka i njegove povišene temperature, ali se smanjenje aerodinamičke sile otpora redovito odvija puno brže nego pad snage motora. Pošto je tehničkim pravilima za trkaće automobile unutar iste klase redovito propisana maksimalna snaga kroz dimenziju restriktora usisa, veći problem je uvijek pregrijavanje motora uslijed manjka efikasnog hlađenja unutar aerodinamičkog traga vodećeg vozila.

## 1.2 Problem cestovnog transporta/prometa

Kako ljudska populacija brojčano raste, javlja se potreba za praktičnijim i efikasnijim metodama transporta. U prošlosti je rješenje bila gradnja više prometnica i autocesta u svrhu povećanja kapaciteta broja vozila. No, kako se ovaj trend ne može nastaviti u beskonačnost zbog očitih razloga (ne proizvodi se više površine na Zemlji, dapače, ona se smanjuje), javlja se metoda koju razvija više organizacija od kojih je jedna California PATH (engl. *Partners for Advanced Transit and Highways*) a radi se o automatiziranim sustavima autocesta (engl. *AHS – Automated Highway System*) [1].

Primarni cilj buduće generacije inteligentnih transportnih sustava (engl. *FGITS – Future Generation Intelligent Transport System* [2]) jest povećanje protoka vozila na autocestama što se postiže grupiranjem vozila u kolone s malim udaljenostima između vozila. Očekuje se povećanje aerodinamičke efikasnosti vozila unutar kolone pošto se njihovi koeficijenti aerodinamičkog otpora smanjuju sa smanjenjem udaljenosti između

vozila. Ovakav način vožnje doveo bi do smanjenja potrošnje goriva, emisija štetnih plinova te do povećanja sigurnosti na autocestama.



**Slika 1. FGITS i vožnja u kolonama (PATH, 1997.)**

Vozila opremljena ITS-om imala bi senzore udaljenosti, adaptivne sustave kočenja, globalne sustave pozicioniranja (GPS) te ostale ITS sustave koji bi omogućili vozilima da sigurno putuju jedno iza drugoga na udaljenostima manjima od duljine jednog vozila, što uvelike teži željezničkim kompozicijama vagona. Međutim, prije nego što ovakvi sustavi budu spremni za implementaciju, potrebno je detaljno proučiti aerodinamičkog ponašanja vozila koja se kreću na malim udaljenostima jedna iza drugih. Organizacija PATH izvela je određena aerodinamička ispitivanja s raznim oblicima interferencija među vozilima koja će biti prokomentirana u nastavku rada.



## 2 Literatura na temu trkaćih vozila

Zbog natjecateljske prirode automobilizma kao sporta, postoji određena doza tajnosti vezana uz tehnološke aspekte vozila i njihovih performansi što uvelike otežava pronalaženje korisne referentne literature. Literatura koja je dostupna redovito je ili dovoljno stara da nema prevelikog utjecaja na trenutnu situaciju u natjecateljskom automobilizmu ili je istraživanje u literaturi vršeno od strane akademije koja ima puno liberalniji odnos prema dijeljenju znanja. Stoga, u daljnjem tekstu će biti izneseni pronađeni primjeri iz literature vezane uz probleme *draftinga* (vožnje u zavjetrini automobila ispred) u automobilizmu.

### 2.1 Promjena tehničkih pravila vezanih uz aerodinamiku Formula 1 bolida od 2009. godine nadalje [3].

Kako se budžeti Formula 1 timova iz godine u godinu povećavaju samim time i tehnološki razvoj, posebno razvoj aerodinamike, počinje kočiti natjecateljstvo između vozača. Aerodinamička sila negativnog uzgona (engl. *downforce*) za koju su zaslužna krila i podnica F1 automobila postala je toliko velika da aerodinamički trag bolida i snažni vrtlozi koji se tamo nalaze ometaju tj. smanjuju performanse pratećih bolida – i to u dovoljnoj mjeri da onemogućuju preticanja i konkurentne utrke. Ovo pak predstavlja problem za vozače koji traže ravnomjerne šanse za pobjedu u natjecanju, i za gledatelje koji su željni utrka punih uzbuđenja, preticanja i nepredvidivih ishoda. Prema tome, smanjenje aerodinamičkog traga i pratećih vrtloga postalo je od iznimne važnosti za budućnost sporta.

Upravno tijelo Formule 1 – Federation Internationale de L'Automobile (FIA) reagiralo je krajem 2006. godine donošenjem novih tehničkih pravila vezanih za aerodinamiku bolida za 2009. godinu. Novi pravilnik stavlja zabrane na kompleksnu geometriju tijela bolida, zakrilca i aerodinamički oblikovane dijelove ovjesa između prednje i stražnje osovine

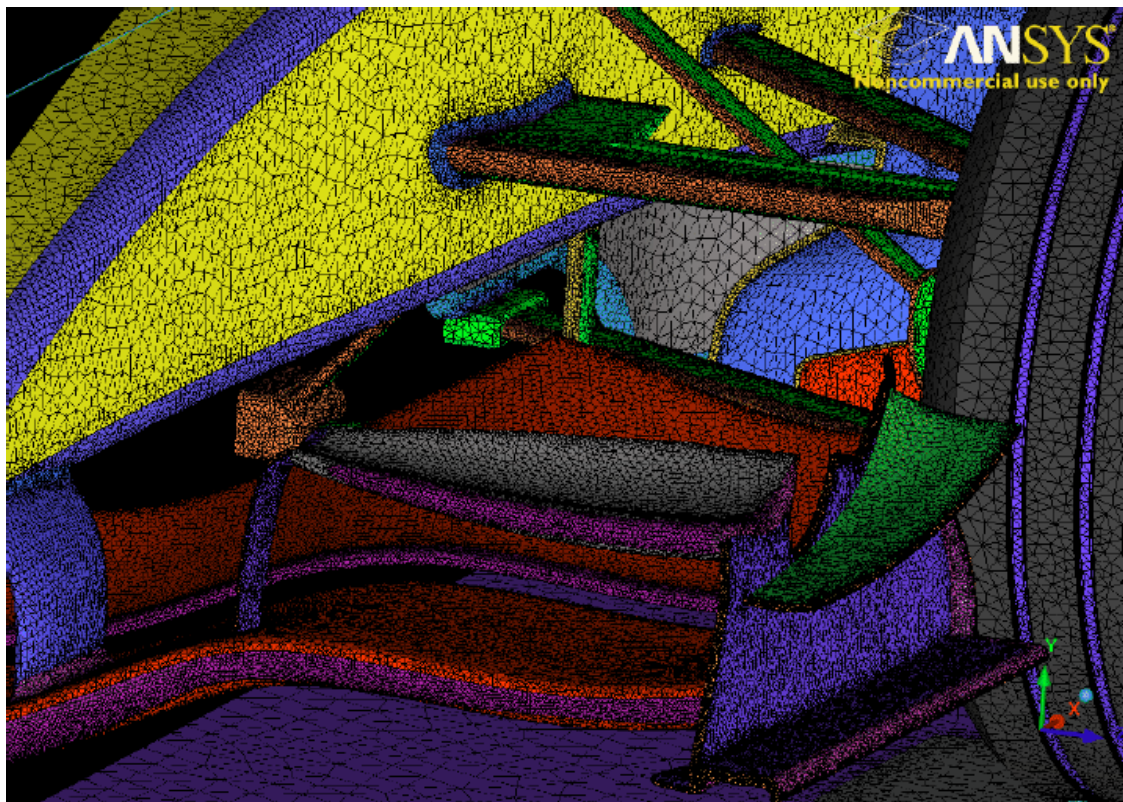
bolida. Stražnjem krilu smanjen je raspon ali je ono podignuto po vertikalnoj osi u svrhu smanjenja zavisnosti s difuzorom podnice. Prednje krilo pomaknuto je bliže zemlji te mu je povećan raspon u svrhu smanjenja osjetljivosti na aerodinamički trag ostalih vozila te povećano korištenje *ground efekta*. Zajedno, od ovih mjera očekuje se smanjenje aerodinamičkog otpora i negativnog uzgona za 50%.

Pošto analitička rješenja nisu moguća a testiranje u zračnim tunelima je izrazito skupo, posebno za preliminaru, istražnu studiju autori su se odlučili za numeričku analizu (CFD). Bolid Formule 1 prema predloženim tehničkim pravilima za 2009. godinu analiziran je u samostalnoj vožnji i pri praćenju identičnog bolida na udaljenosti  $2.4L$ , gdje je  $L$  duljina bolida. Bolid prema tehničkim pravilima iz 2007. godine također je analiziran u istim uvjetima u svrhu kvantifikacije efikasnosti novog pravilnika u ciljanim naprecima.

Većina vanjskih komponenti bolida Formule 1 konstruirana je iznad svega u svrhu poboljšanja aerodinamičkih performansi. Sve komponente na bolidu izrazito su ovisne jedna o drugoj te ih se ne može razumno analizirati u izolaciji. Zbog velikog broja komponenti koje imaju značajan utjecaj na aerodinamičke performanse bolida, popraćenih izrazitim međusobnim zavisnostima, pri analizi su korišteni cjeloviti modeli F1 bolida.

Za izradu mreže konačnih volumena korišten je softver ICEM CFD 11.0.1 unutar kojega je stvorena hibridna mreža sačinjena od heksaedarskih, tetraedarskih i prizmatских elemenata što je omogućilo korištenje odgovarajuće vrste elemenata u svakom od dijelova domene. Tetraedarski elementi korišteni su u blizini samog vozila jer omogućuju obuhvaćanje kompleksne geometrije uz pomoć automatiziranog algoritma izrade mreže koji podržava paralelni rad više procesora na izradi mreže, te relativno malu iskrivljenost elemenata. Međutim, za dijelove domene udaljenije od vozila, gdje su gradijenti promatranih veličina manji, poželjno je bilo imati manji broj elemenata te su iz tog razloga korišteni kvalitetniji heksaedarski elementi koji smanjuju numeričku difuziju

rezultata, povećavaju točnost te su idealni za slučajeve kada je smjer strujanja paralelan sa smjerom elemenata. Za obuhvaćanje efekata unutar graničnih slojeva čvrstih stijenki korišteni su prizmatički elementi s dovoljnom razinom progušćenja u svrhu postizanja željenih vrijednosti  $y^+$ . Slika 2. prikazuje površinsku mrežu konačnih elemenata na modelu bolida prema tehničkim pravilima iz 2007. godine gdje područja iste boje označavaju iste postavke mreže.



Slika 2. Detalj mreže konačnih elemenata na prednjem dijelu bolida iz 2007. godine

U područjima uz čvrste stijenke korištene su zidne funkcije koje su omogućile smanjeni broj konačnih elemenata i njihovu bolju kvalitetu. Iako zidne funkcije donekle smanjuju točnost rješenja u odnosu na direktno rješavanje graničnog sloja, za komparativnu analizu nije neophodna takva razina točnosti, dok je smanjenje broja konačnih elemenata bitno zbog ograničenih računalnih resursa. Ciljana vrijednost  $y^+$  bila je 60 kako bi se izbjeglo smještanje prvih elemenata ispod granice logaritamskog zakona funkcije zida, te

da se ujedno omogući popunjavanje najoštrijih radijusa geometrije s prizmatskim elementima. Konačne veličine mreža bile su 19 i 14 milijuna konačnih elemenata za izolirane bolide iz 2007. i 2009. godine, te 30 i 40 milijuna konačnih elemenata za mreže s po dva bolida u domeni.

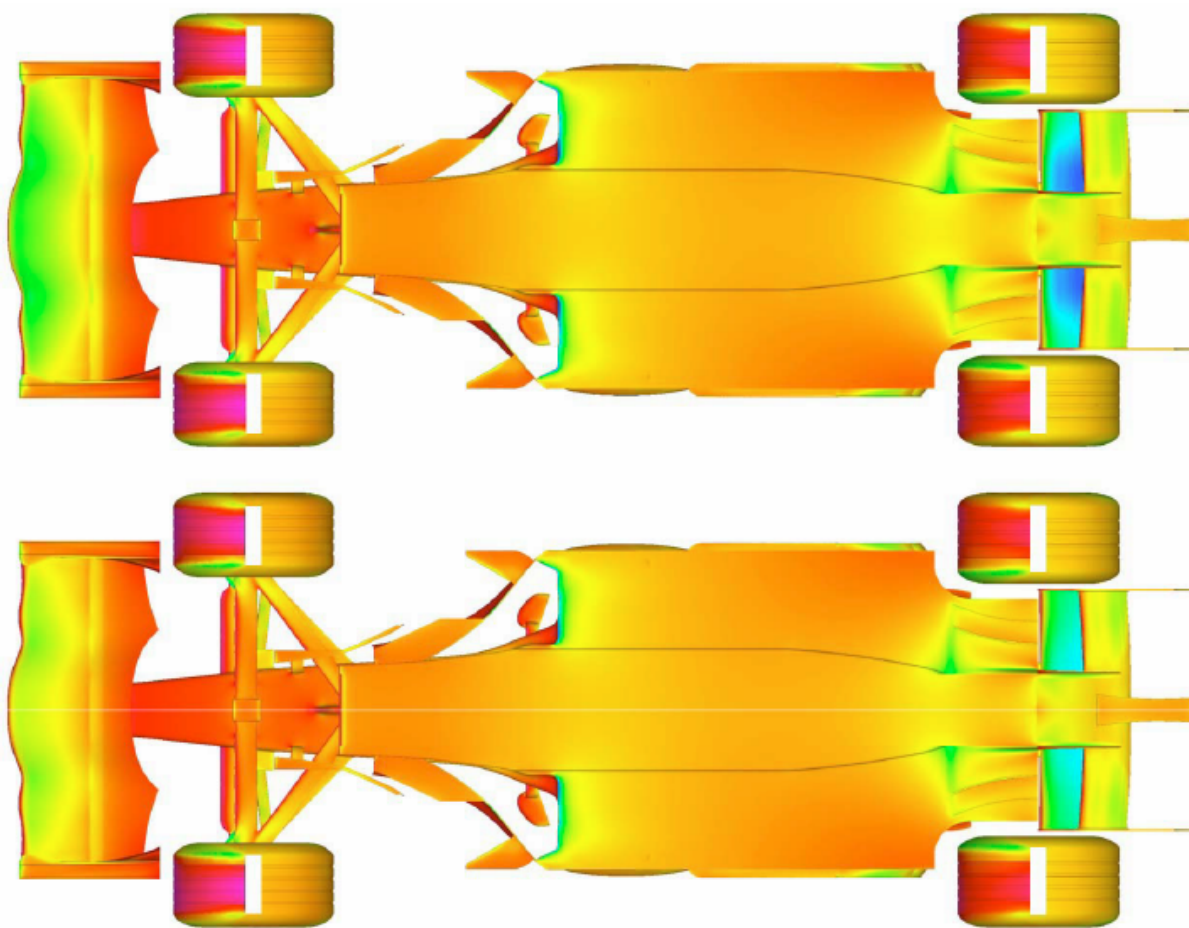
Korišten je ANSYS Fluent 6.3.26 solver s modelom nestačivog strujanja zbog relativno male brzine strujanja od 60 m/s pri kojoj gustoća varira ispod 1 % za vršnu vrijednost Machovog broja. Korišteni rubni uvjeti bili su brzina strujanja na ulasku u domenu, konstantni atmosferski tlak na izlasku iz domene te simetrije na svim ostalim zidovima osim poda koji je zadan kao translacijski pokretni zid iste brzine kao brzina nastrujavanja na bolid. Veličina domene odabrana je tako da njen utjecaj na rješenje bude zanemariv te se rastezala  $12L$  straga te  $6L$  ispred, bočno i iznad bolida. Korišten je  $k - \varepsilon$  model turbulencije koji je bio pogodnih karakteristika za tip mreže i metode rješavanja ovog problema.

Od pojednostavljenja uvedena su sljedeća:

- izmjenjivač topline (hladnjak) tretiran je kao površina na kojoj se disipira određena količina toplinskog toka što je uzeto kao količina topline koja odgovara efikasnosti motora od 40% pri nazivnoj snazi od 550 kW,
- motor je zamijenjen s rubnim uvjetom masenog protoka koji izlazi iz domene, a koji je izračunat na temelju volumena motora te broja okretaja,
- ispušni plinovi motora su zbog malog stehiometrijskog omjera goriva (1/14) vraćeni u domenu kroz rubni uvjet masenog protoka čistog zraka koji ulazi u domenu pri povišenoj temperaturi.

Zbog toga što se analizira situacija neposredno prije preticanja trkaćih vozila pretpostavljeno je maksimalno opterećenje motora pri nazivnoj maksimalnoj snazi i broju okretaja. Ovakva situacija također bi zahtijevala ne korištenje kočnica te je njihov nestacionarni prijenos topline zanemaren poradi jednostavnosti.

Analizom dvaju bolida iz 2007. godine pri međusobnoj udaljenosti  $2,4L$  (13,8 m) vidljivo je iz kontura statičkog tlaka da aerodinamički trag vodećeg vozila ima znatan utjecaj na prateće vozilo. Aerodinamička sila negativnog uzgona na pratećem bolidu niža je za 17,3% u usporedbi s istim bolidom u samostalnoj vožnji. Ovaj iznos poklapa se sa studijom na F1 bolidima iz 2004. godine provedenoj od strane BMW Sauber F1 tima, koji su prijavili da postoji gubitak negativnog uzgon od 18% pri sličnim vrijednostima negativnog uzgona. Iako ovo nije konkretan dokaz, red veličine dobivenih rezultata pokazuje da se radi o smislenom iznosu. Slika 3. ilustrira ovu vrijednost kroz konture statičkog tlaka ispod vodećeg automobila (gore) i pratećeg automobila (dolje).



Slika 3. Konture statičkog tlaka na vodeći (gornji) i prateći (donji) bolid iz 2007. god.

Pogledom na podnice bolida primjećuje se da ne postoje značajne razlike između dvaju bolida, te da je negativni uzgon dvaju bolida skoro identičan. Razlog ovome jest taj što

dominantan vrtložni trag vodećeg bolida nema pretjeranog utjecaja na udaljenosti 10-20 mm od tla. Međutim, njegov utjecaj na prednje i stražnje krilo znatno je izraženiji. Stražnje krilo pratećeg vozila gubi 24,1% svog negativnog uzgona, dok prednje krilo gubi 11,7%. Osjetljivost prednjeg krila značajno je manja opet zbog toga što utjecaji vrtložnog traga vodećeg vozila nisu dominantni tako blizu tlu. Veći gubici negativnog uzgona na stražnjem krilu imaju za posljedicu pomak centra tlaka prema naprijed što uzrokuje smanjenje stabilnosti bolida te pomiče karakteristike upravljanja prema preupravljanju (engl. *oversteer*) – nestabilnom stanju pri kojem stražnji kotači gube trakciju prije prednjih.

Prema tome, dva su značajna nedostatka za prateće vozilo prema tehničkom pravilniku za 2007. godinu – značajan gubitak negativnog uzgona i pomak aerodinamičkog balansa bolida. Uz ove gubitke za prateći bolid, treba napomenuti da vodeći bolid ima određene prednosti, najvažnija od kojih jest povećanje negativnog uzgona za skoro 1%. Tabela 1 pokazuje postotnu promjenu sila otpora i negativnog uzgona u odnosu na bolid u samostalnoj vožnji.

Tabela 1. Utjecaj *draftinga* na F1 bolid iz 2007. godine

	Negativni uzgon vs. samostalni bolid	Otpor vs. samostalni bolid
Vodeći bolid	+0,9%	8,4%
Prateći bolid	17,3%	10,2%

Dok tehnički pravilnik za 2009. godinu unosi izmijene u skoro svaki sustav na F1 bolidu, najveće i najvidljivije promjene biti će one na vanjskoj aerodinamici bolida. Tabela 2 ukazuje na neke od većih promjena planiranih za 2009. godinu te ih uspoređuje s pravilnikom za 2007. godinu. Jedna od najvećih promjena jest zabrana zakrilaca i zahvatnih profila kotača prisutnih na većini bolida iz 2007. godine. Eliminacija vrtloga uzrokovanih ovim elementima trebala bi značajno doprinijeti smanjenju vrtložnog traga bolida. Ovi elementi ne samo da samostalno proizvode negativni uzgon, nego su usko vezani sa stražnjim krilom bolida te bi njihova zabrana trebala smanjiti i raspoloživi negativni uzgon stražnjeg krila.

Tabela 2. Usporedba tehničkih pravila za 2007. i 2009. godinu

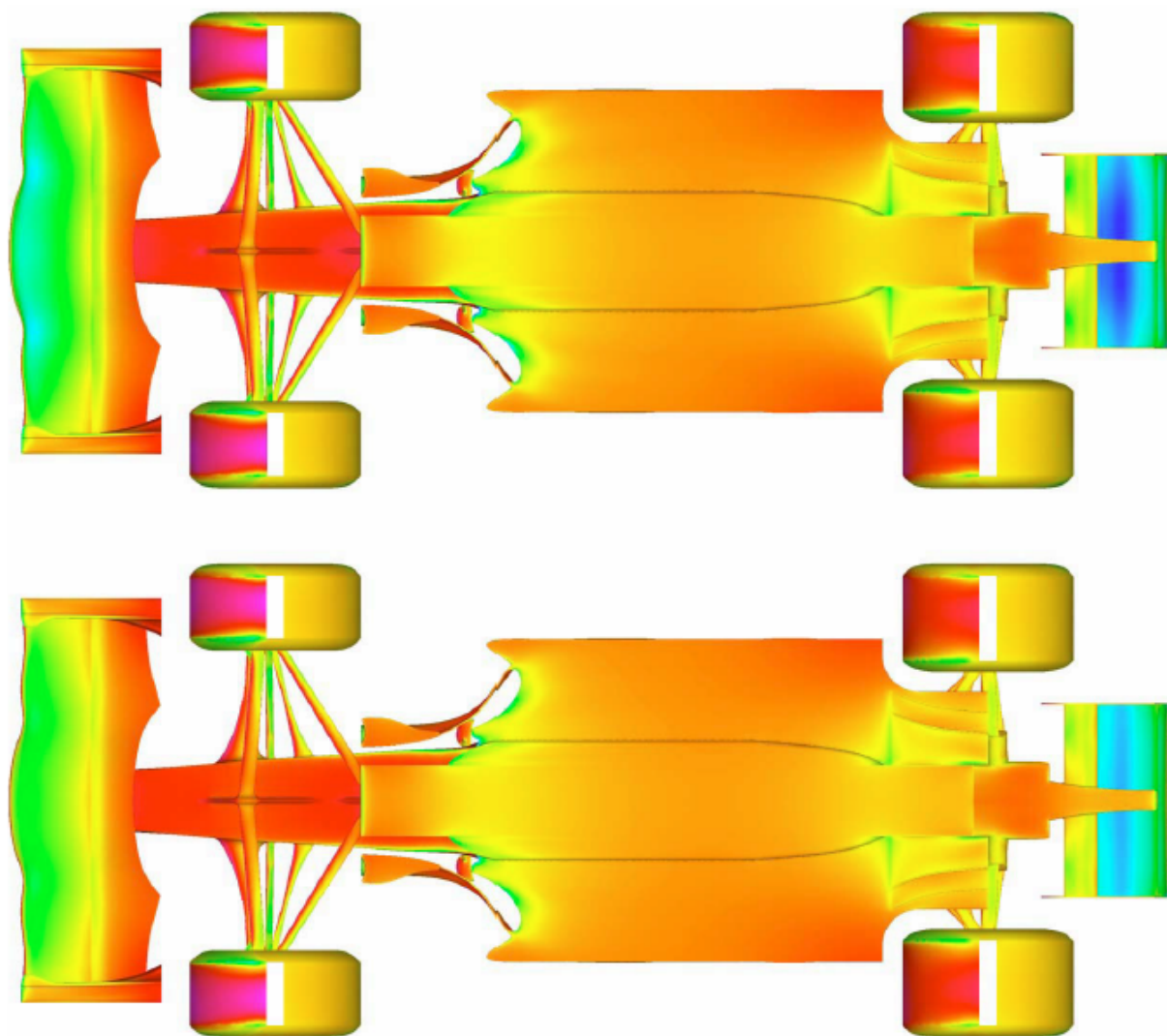
Tehnički pravilnik za 2007. godinu	Tehnički pravilnik za 2009. godinu
<b>Prednje krilo</b>	
Širina prednjeg krila ne veća od 1400 mm	Širina prednjeg krila ne veća od 1800 mm
Prednje krilo ne niže od 150 mm iznad tla	Prednje krilo ne niže od 100 mm iznad tla
Tijelo bolida između osovina ne šire od 1400 mm	Tijelo bolida između osovina ne šire od 1600 mm
Prednje krilo ne više od 350 mm iznad tla	Prednje krilo ne više od 335 mm iznad tla
Bez restrikcija na poprečni presjek između osovina	Nisu dozvoljeni aeroprofilni između osovina
Visina tijela bolida smije varirati između osovina	Mjera visina bolida mora se smanjivati pri uzdužnom pomaku prema stražnjem kraju bolida
<b>Stražnje krilo</b>	
Raspon stražnjeg krila ograničen na 1000 mm	Raspon stražnjeg krila ograničen na 800 mm
Stražnje krilo ne više od 800 mm od tla	Stražnje krilo ne više od 920 mm od tla
Stražnje krilo ne niže od 600 mm od tla	Stražnje krilo ne niže od 740 mm od tla
Stražnje krilo od 2 elementa	Stražnje krilo od 2 elementa bez zakrivljenosti
Početni rub stražnjeg krila iza stražnje osovine	Početni rub stražnjeg krila 250 mm iza stražnje osovine
Maksimalna duljina tetive 330 mm, bez restrikcija na varijaciju	Maksimalna duljina tetive 330 mm, nije dozvoljena varijacija
<b>Podnica</b>	
Stražnji difuzor ne viši od 125 mm iznad tla	Stražnji difuzor ne viši od 100 mm iznad tla
Bez ograničenja unutar 150 mm oko osi simetrije bolida	Ravna podnica (bez dodatne geometrije) unutar 360 mm od osi simetrije bolida

U novom pravilniku doista je smanjen otpor i negativni uzgon bolida. Vrtložni trag prednjeg krila također je smanjen uslijed zabrane korištenja gornjeg elementa krila te aerodinamički oblikovanih elemenata ovjesa. Vrtložni trag iza bolida mnogo je slabiji nego kod bolida iz 2007. godine. Negativni uzgon podnice smanjen je za 48% dok je stražnje krilo izgubilo 26% negativnog uzgona. Međutim, ove mjere nisu ispunile očekivanja FIA-e. Unatoč opsežnim izmjenama pravilnika, negativni uzgon bolida u 2009. godini samo je 35% manji od onoga iz 2007. godine. Smanjenje sile otpora zraka također je podbacilo – samo 17% smanjenja u odnosu na planiranih 50%. Ovo je uvelike posljedica novih širih kotača koji više nisu zaštićeni karoserijom bolida.

Uvelike kao i pod pravilnikom za 2007. godinu, gubici negativnog uzgona pratećeg bolida značajni su i vidljivi iz kontura statičkog tlaka ispod vodećeg i pratećeg bolida. Slika 4 pokazuje konture statičkog tlaka (u istom mjerilu kao i za 2007. godinu) ispod vodećeg i



pratećeg bolida prema tehničkom pravilniku za 2009. godinu. Unatoč mjerama poduzetim od strane FIA-e, vodeći bolid još uvijek ima ogromnu prednost nad pratećim bolidom. Konture tlaka na podnici opet su skoro identične za oba bolida, dok su konture tlaka na oba krila puno tamnije za vodeći bolid što ukazuje na puno višu vrijednost negativnog uzgona za vodeći bolid.



Slika 4. Konture statičkog tlaka na vodeći (gornji) i prateći (donji) bolid iz 2009. god.

U usporedbi s bolidom 2009. godine u izolaciji, stražnje krilo pratećeg bolida gubi 16,9% negativnog uzgona, dok prednje krilo gubi 25% negativnog uzgona. Ukupni iznos negativnog uzgona pratećeg bolida je 25,7% niži u odnosu na bolid u izolaciji, što je čak



48,5% više gubitka u odnosu na pravilnik za 2007. godine. Tabela 3 ukazuje na promjene u negativnom uzgonu i otporu za oba bolida, koristeći samostalni bolid kao osnovicu.

**Tabela 3. Utjecaj *draftinga* na F1 bolid iz 2009. godine**

	Negativni uzgon vs. samostalni bolid	Otpor vs. samostalni bolid
Vodeći bolid	0,6%	1,1%
Prateći bolid	25,7%	4,6%

Potpuno je kontra intuitivno povjerovati da će tehnički pravilnik rezultirati tako obrnutim efektom. Smanjeni negativni uzgon i uklanjanje zakrilaca na vodećem bolidu trebaju stvoriti čišći aerodinamički trag bolida i smanjiti osjetljivost pratećih bolida u situacijama *draftinga*. Ali rezultati pokazuju obrnuto jer, iako vodeći bolid iz 2009. godine stvara čišći aerodinamički trag, utjecaji ovog traga premješteni su na dijelove pratećeg bolida koji su prije bili neosjetljivi na njih. To znači da u usporedbi sa bolidom iz 2007. godine, podnica i prednje krilo pratećeg F1 bolida iz 2009. godine su znatno osjetljiviji na aerodinamički trag vodećeg bolida. Tabela 4 uspoređuje gubitak performansi za tri glavne aerodinamičke komponente pratećeg bolida pod pravilima iz 2007. i 2009. godine.

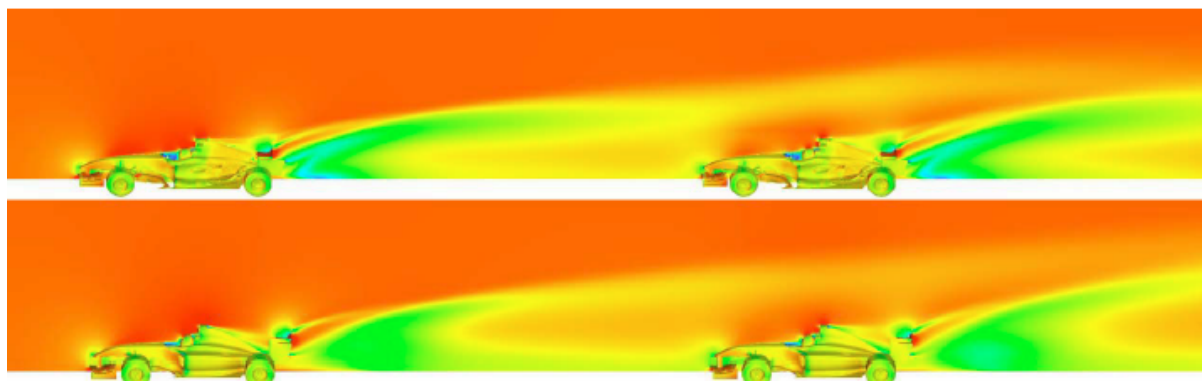
**Tabela 4. Gubitak performansi za glavne aerodinamičke komponente pratećeg bolida**

Komponenta	Gubitak negativnog uzgona za 2007.	Gubitak negativnog uzgona za 2009.
Cijeli bolid	17,4%	25,7%
Stražnje krilo	24,1%	16,9%
Prednje krilo	11,7%	25,0%
Podnica	6,3%	14,2%

Kao što je vidljivo iz tabele, gubici za prednje krilo i podnicu pratećeg bolida u 2009. godini skoro su duplo veći u odnosu na iznose iz 2007. godine. S druge strane, stražnje krilo ima značajno manje gubitke u 2009. nego u 2007. godini.

Smanjenje iznosa negativnog uzgona trebalo bi za posljedicu imati čišći aerodinamički trag s višim dinamičkim tlakom. Bližim pogledom na aerodinamičke tragove sazna se zašto je smanjena osjetljivost stražnjeg krila dok je pogoršana osjetljivost prednjeg krila i

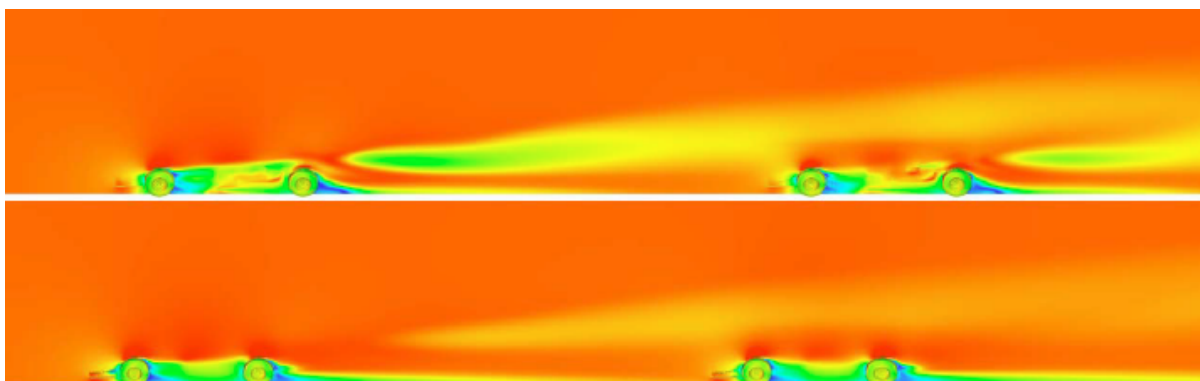
podnice. Slika 5 i Slika 6 prikazuju konture brzine strujanja na ravninama simetrije bolida (i domene) . U obje slike su mjerila tj. skale brzine strujanja konzistentne te su bolidi iz 2007. godine prikazani iznad onih iz 2009. godine.



**Slika 5. Konture brzine strujanja na ravninama simetrije bolida (i domene) za bolide iz 2007. (gore) i 2009. (dolje) godine**

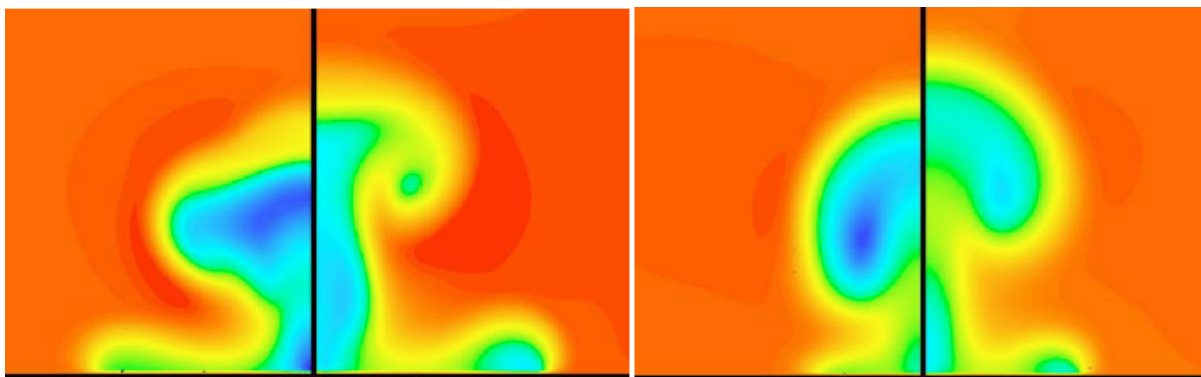
Aerodinamički trag bolida prema novom tehničkom pravilniku je, iako ukupno manji, značajno izraženiji u blizini tla. Slika 5 prikazuje da je gornji dio aerodinamičkog traga formiran spajanjem vrtloga s vrha stražnjeg krila znatno jači za bolid iz 2007. godine (proteže se skoro 50 % dalje u usporedbi sa bolidom iz 2009. godine). Povećana snaga gornjeg dijela aerodinamičkog traga objašnjava zašto stražnje krilo prema pravilniku iz 2007. gubi više negativnog uzgona nego ono iz 2009. godine.

Niži dio aerodinamičkog traga, dominiran uvelike spajanjem aerodinamičkih tragova kotača, mnogo je izraženiji kod bolida iz 2009. godine. Ovaj donji dio aerodinamičkog traga proteže se mnogostruko dalje iza bolida nego što je to bio slučaj u 2007. godini. Pošto se zrak koji protječe ispod bolida povlači većinom iz područja blizu tla i to iz središnjeg dijela bolida, utjecaj na podnicu također je značajan. Slično tome, središnji dio prednjeg krila najbliži je tlu što ga čini osjetljivim na ovaj aerodinamički trag, a upravo je središnji dio krila odgovoran za većinu negativnog uzgona te komponente. Zaključuje se da je mnogo snažniji aerodinamički trag u blizini tla zaslužan za povećane gubitke performansi prednjeg krila i podnice prema novom tehničkom pravilniku.



Slika 6. Konture brzine strujanja na ravninama koje prolaze sredinom prednjih kotača za bolide iz 2007. (gore) i 2009. (dolje) godine

Slika 7. prikazuje konture brzine strujanja u ravninama okomitima na smjer gibanja bolida udaljenima 1 m i 4,5 m od stražnjeg kraja vodećeg bolida. Gornji dio aerodinamičkog traga bolida iz 2007. godine znatno je snažniji (hladnije plave boje) od onoga iz 2009. godine i to na obje udaljenosti. Aerodinamički trag bolida iz 2007. godine također se proteže šire od simetrale bolida uslijed veće širine stražnjeg krila. Reducirana snaga aerodinamičkog traga u višim predjelima (dalje od tla) jest ono što je za posljedicu imalo smanjenu osjetljivost stražnjeg krila bolida iz 2009. godine na aerodinamički trag vodećeg bolida. U tom pogledu, novi tehnički pravilnik je bio uspješan, ali aerodinamički trag u blizini tla je puno gori iza bolida 2009. godišta. Ovaj snažniji niži trag je najvjerojatnije rezultat povećane širine kotača i uklanjanja zaštitnih elemenata karoserije koji su se nalazili ispred njih. Lokacija vrtloga kotača na udaljenosti 1 m iza bolida potpuno je bezazlena, ali vrtlozi oba stražnja kotača nastavljaju se gibati prema simetrali bolida što se više udaljavamo te završavaju direktno u području iz kojega se zrakom napajaju prednje krilo i podnica pratećeg bolida [3].



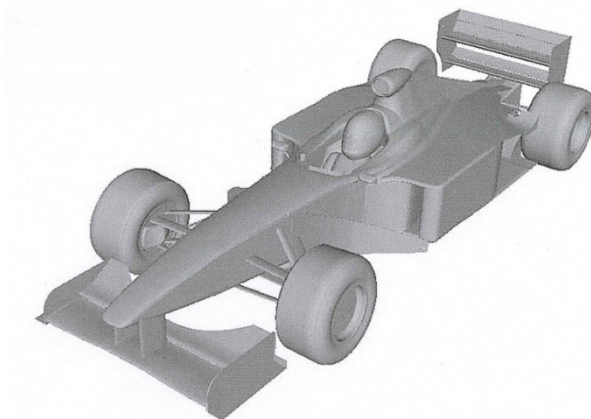
Slika 7. Konture brzine strujanja 1 m (lijevo) i 4.5 m (desno) iza vodećeg bolida za bolide iz 2007.

(lijevo) i 2009. (desno) godine

Prema tome, FIA-ina odluka o eliminiranju dijelova karoserije je naštetila performansama pratećeg bolida. Uklanjanjem dijelova karoserije u blizini stražnjeg kotača te njegovim proširenjem, performanse dvaju elemenata koji su do tada bili najmanje osjetljivi na aerodinamički trag – prednje krilo i podnica – dramatično su smanjene. Kada se bavimo kompleksnim i interakcijski vezanim problemima, donošenje intuitivnih promjena može za posljedicu imati potpuno suprotan efekt od očekivanog.

### 2.3 BAR Honda F1 i Advantage CFD [4]

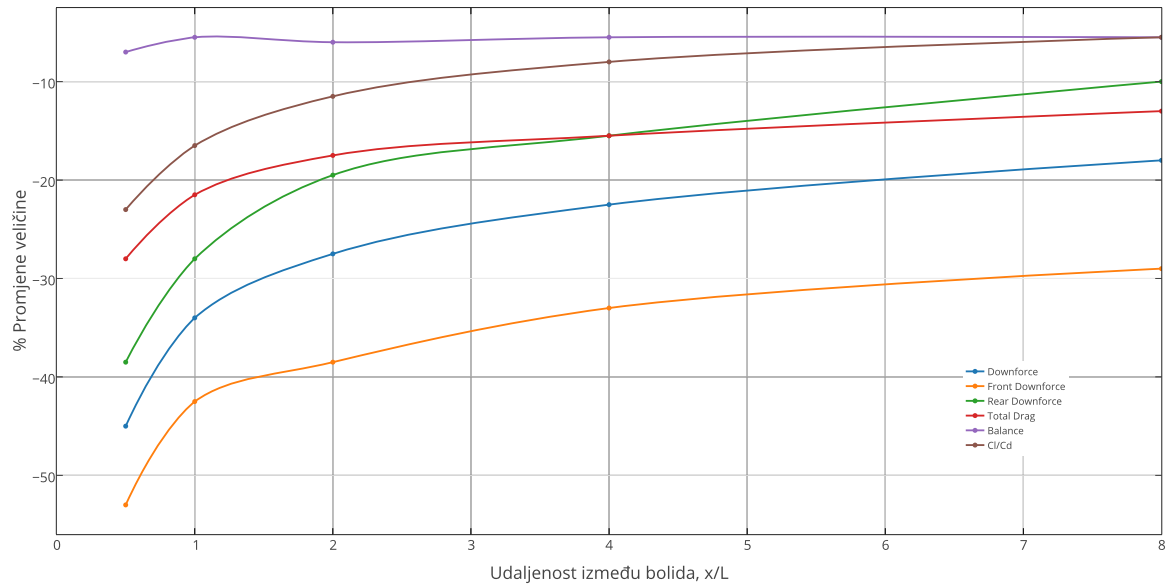
Sličan interes za saznavanjem više informacija o interakciji strujanja pri vožnji dvaju bolida jedan iza drugoga imala je i F1 momčad BAR Honde koja je naložila svojem polu-autonomnom CFD ogranku Advantage CFD da izvede studiju interakcije strujanja dvaju svojih bolida ranije generacije. Iako su se konfiguracije bolida u međuvremenu značajno promijenile, općeniti trendovi strujanja još uvijek su prisutni.



Slika 8. Geometrija bolida BAR Honde korištena pri ispitivanju

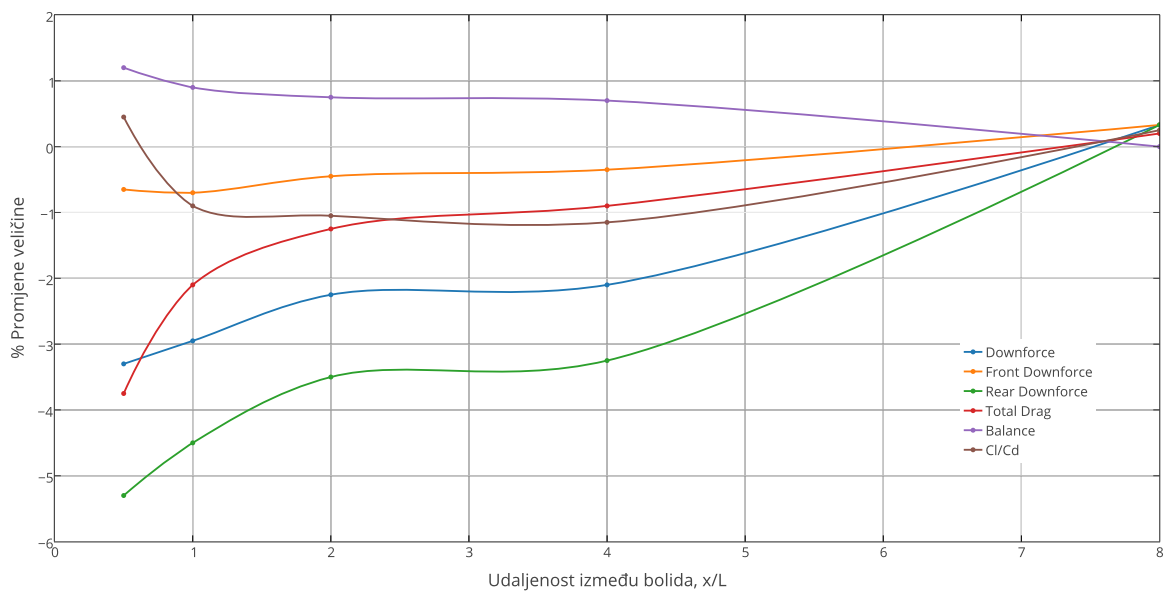
Ispitan je slučaj vožnje dvaju bolida pri razmacima od  $x/L = 0.5$  do 8, gdje je  $L$  duljina vozila, pri brzinama od 320 km/h te su rezultati uspoređeni s vrijednostima dobivenima za samostalno vozilo. Slika 9. prikazuje postotnu promjenu svih sila koje djeluju na prateći bolid. Očit je pad u otporu i ukupnom negativnom uzgonu, koji se povećava što se udaljenost između bolida smanjuje. Čak i na međusobnoj udaljenosti  $x/L = 8$  prateći bolid osjeća 13% smanjenje u otporu, ali i 18% smanjenje negativnog uzgona. Ove vrijednosti rastu do 28% za otpor i 45% za negativni uzgon na međusobnoj udaljenosti  $x/L = 0.5$ . Detaljnijim razmatranjem dijagrama vidljivo je da iako je cijeli bolid izgubio negativni uzgon, prednji kraj je taj s daleko većim gubitkom što rezultira znatnim pomakom aerodinamičkog balansa prema stražnjoj osovini. Ovaj pomak aerodinamičkog balansa vidljiv je preko cijelog raspona međusobnih udaljenosti s prosječnim pomakom od oko 6% straga. Gubitak negativnog uzgona na prednjem kraju kretao se od 29% pri udaljenosti  $x/L = 8$  sve do 53% na udaljenosti  $x/L = 0.5$ , dok

je gubitak negativnog uzgona na stražnjem kraju iznosio svega 10% na  $x/L = 8$  te skoro 39% na  $x/L = 0.5$ .



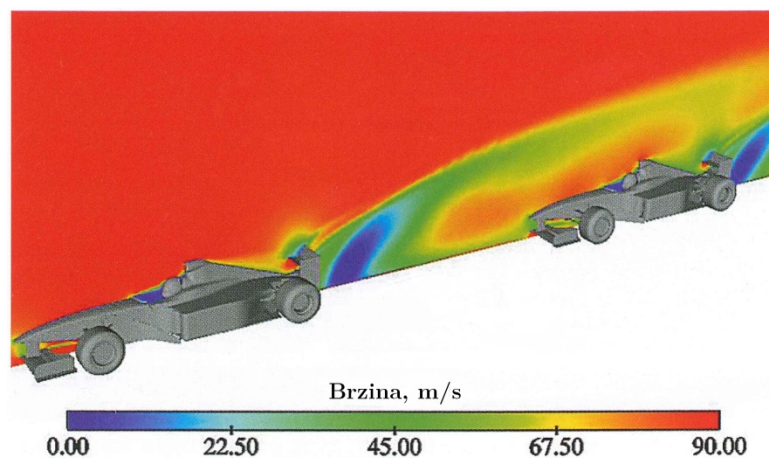
Slika 9. Postotna promjena veličina na prateći bolid u odnosu na samostalni bolid

Slika 10. prikazuje utjecaj međusobnog razmaka na aerodinamičke sile vodećeg bolida. Vidljivo je da vodeći bolid također osjeća prisutnost pratećeg bolida, ali u puno manjoj mjeri nego obrnuto. Vrijedi spomenuti da od svih promjena veličina ona koja će imati najviše utjecaja na balans bolida i dinamičke karakteristike jest gubitak negativnog uzgona na stražnjem kraju koji se povećavao sa smanjivanjem međusobnog razmaka i iznosio 5% pri  $x/L = 0.5$ . Negativni uzgon na prednjem kraju također se smanjio ali u puno manjoj mjeri, te se ukupna raspodjela negativnog uzgona pomiče prema naprijed što potencijalno dovodi do preupravljanja (engl. *oversteer*) vodećeg bolida pri kočenju i ulasku u zavoj. Ukupna sila otpora zraka doživjela je najveći pad pri  $x/L = 0.5$  te je on iznosio oko 4% - efekt koji se često iskorištava unutar momčadi uz pomoć kojeg oba vozača postižu bolja vremena po krugu nego što bi bilo moguće pri samostalnoj vožnji bez prisutnosti drugog bolida.



Slika 10. Postotna promjena veličina na vodeći bolid u odnosu na samostalni bolid

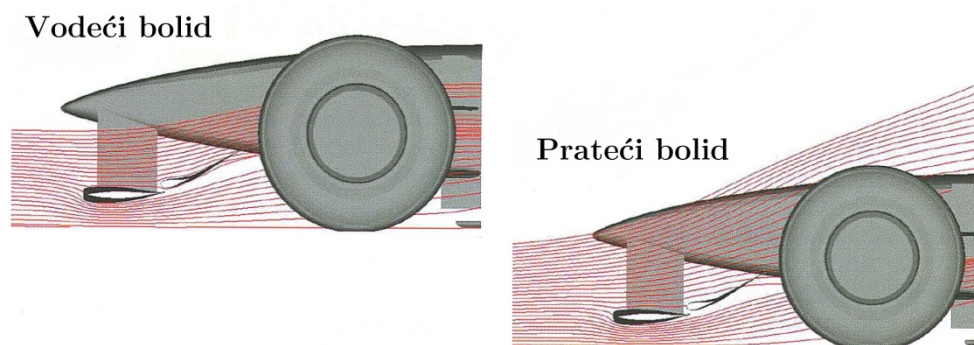
CFD vizualizacija pomaže bliže dočarati što se točno događa. Slika 11. prikazuje raspodjelu brzine strujanja u ravnini simetrije bolida pri međusobnom razmaku  $x / L = 1$ .



Slika 11. Raspodjela brzine strujanja u ravnini simetrije bolida pri  $x / L = 1$ , m/s

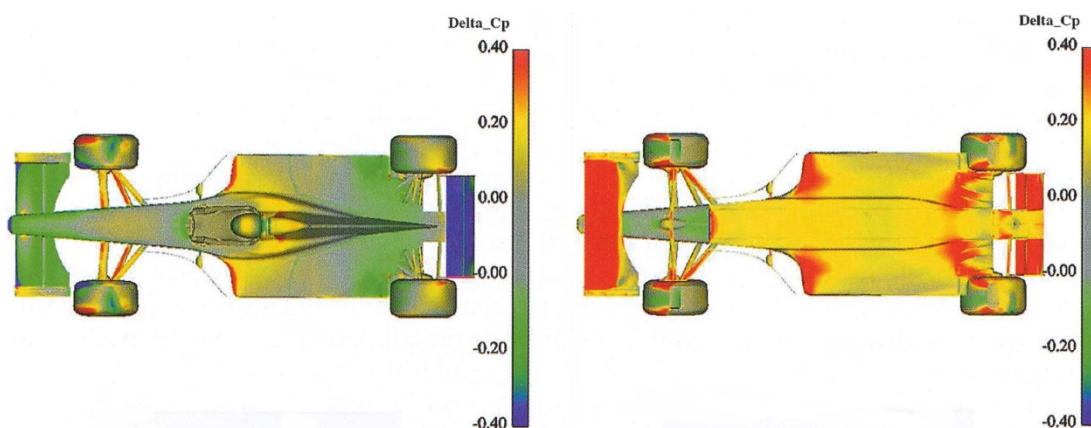
Očito je da strujanje usporava u vrtložnom aerodinamičkom tragu vodećeg bolida te da ovo smanjenje brzine strujanja dovodi do smanjenja sile otpora i negativnog uzgona na pratećem bolidu. Slika 12. pruža detaljniji odgovor na razloge većeg gubitka negativnog uzgona na prednjem kraju pratećeg bolida. Strujnice prikazuju značajnu razliku u kutu nadolazećeg strujanja u trenutku kada ono pogađa prednje krilo bolida, efektivno,

prateći bolid ima manji napadni kut prednjeg krila što rezultira smanjenjem negativnog uzgona na prednjem kraju.



Slika 12. Strujnice na prednjem kraju vodećeg i pratećeg bolida

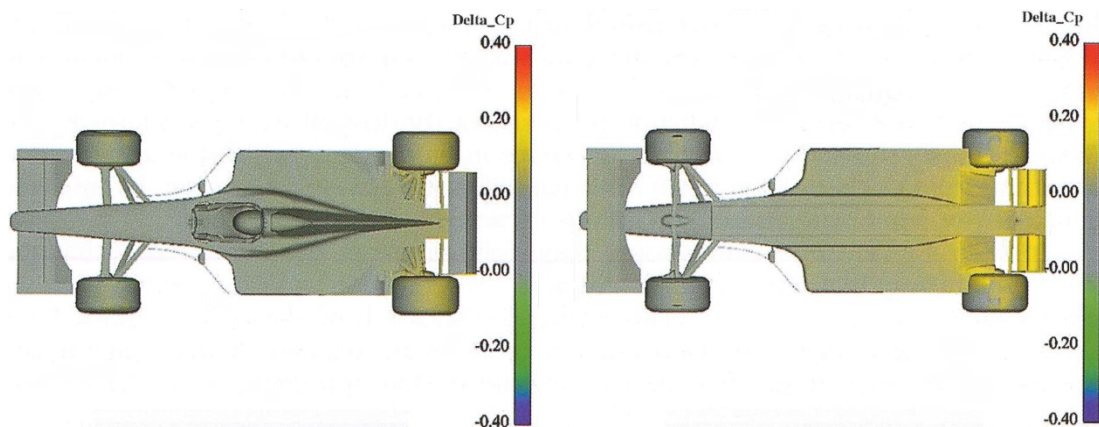
Raspodjelu razlike koeficijenta statičkog tlaka na gornjim i donjim površinama pratećeg i vodećeg bolida u odnosu na samostalni bolid prikazuju Slika 13. i Slika 14. Promatrajući raspodjelu na gornjim površinama pratećeg bolida vidimo da negativne vrijednosti (zelene i plave boje) ukazuju na smanjenje statičkog pritiska na gornjoj površini što za uzrok ima povećanje uzgona. Također, raspodjela na donjim površinama pratećeg bolida ukazuje na povećanje statičkog tlaka (žute i crvene boje) odnosno ponovno povećanje uzgona tj. smanjenje negativnog uzgona koji je u ovom području poželjan. Očito je da krila nisu jedina koja gube negativni uzgon, već da gubitak itekako osjeća i podnica bolida (središnji i bočni dijelovi) te posebice ulazi na bočnim stranicama te ulazi difuzora.



Slika 13. Raspodjela razlike koeficijenta tlaka na gornjim i donjim površinama pratećeg bolida



Promjene u raspodjeli tlaka na vodećem bolidu su suptilnije, kao što prikazuje Slika 14. Vidljiva je mala pozitivna promjena tlaka na gornjim površinama i to većinom straga, te značajnija promjena na stražnjem kraju donjih površina bolida – obje rezultiraju gubitkom negativnog uzgona na stražnjem kraju vodećeg vozila. Na donjoj površini prednjeg krila također je vidljiva mala pozitivna promjena tlaka koja korespondira s prethodno spomenutim malim padom negativnog uzgona na prednjem kraju vodećeg bolida.



Slika 14. Raspodjela razlike koeficijenta tlaka na gornjim i donjim površinama vodećeg bolida

## 2.5 European Late Model Series<sup>1</sup> [4]

MIRA<sup>2</sup> je u svom zračnom tunelu izvela istraživanje pri međusobnom uzdužnom razmaka dvaju SCSA natjecateljskih automobila u punom mjerilu. Zračni tunel imao je nepomičan pod ali uz kontrolu debljine graničnog sloja, dok su dosadašnje CFD simulacije koristile uvjet pokretnog poda. Pošto vozila u ovom slučaju nisu bila jednosjedi sa podnicom vrlo blizu tla te *ground effect*-om, manje sofisticirana simulacija graničnog sloja na podu nije bila od kritične važnosti. Međusobni razmaci vozila također su bili manji nego u CFD simulacijama zbog dimenzijskih ograničenja zračnog tunela te su mjereni od stražnjeg odbojnika vodećeg vozila do prednjeg odbojnika pratećeg vozila.



Slika 15. Ispitivanje utjecaja međusobnog razmaka SCSA automobila u MIRA zračnom tunelu

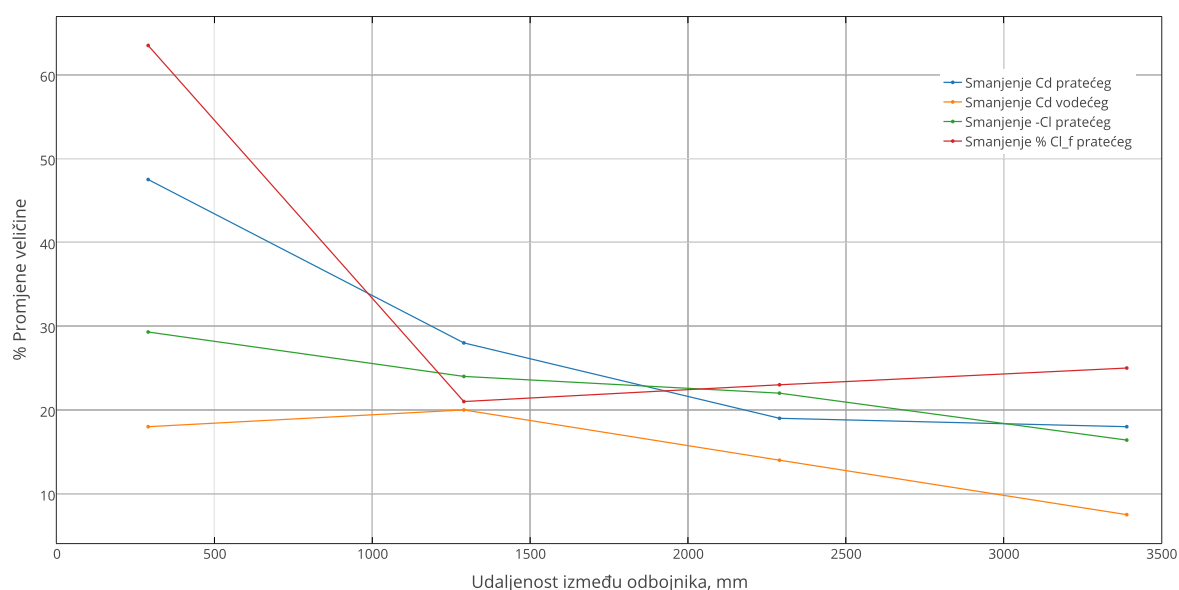
Slika 16. prikazuje postotne promjene veličina koje će biti prokomentirane u nastavku. Najmanje iznenađujuće jest smanjenje sile otpora pratećeg vozila (plava linija) koje raste sa smanjenjem međusobnog razmaka vozila. Ako ove rezultate usporedimo s F1 slučajem

---

<sup>1</sup> European Late Model Series je natjecateljska klasa u automobilizmu čiji je cilj bio donijeti NASCAR/SCSA tip utrka u Europu. Utrke se većinom voze u Belgiji i Ujedinjenom Kraljevstvu na kratkim ovalnim stazama.

<sup>2</sup> MIRA (Motor Industry Research Association) je osnovana 1946. godine kao državno društvo Velike Britanije za istraživanja u automobilističkoj industriji. Danas je privatno društvo istog imena koje pruža usluge istraživanja i razvoja te konzaltinga za mnogobrojna vodeća imena automobilističkog svijeta.

BAR Honde vidimo da je prateći F1 bolid na međusobnoj udaljenosti  $x/L = 0.5$  gubio ~28% sile otpora, dok je na udaljenosti  $x/L = 1$  taj iznos bio ~22%. Udaljenost od pola duljine vozila za slučaj SCSA automobila iznosi 2550 mm, na kojoj se vidi smanjenje sile otpora od ~19%. Zaključak je da je F1 bolid na sličnoj udaljenosti doživio veće smanjenje u sili otpora što bi se moglo pripisati njegovom većem koeficijentu otpora zraka i načinu na koji se otpor stvara (inducirani otpor aeroprofila u odnosu na otpora oblika tupog tijela kod SCSA vozila). Stoga, vožnja u aerodinamičkom tragu vodećeg bolida F1 s izloženim kotačima, pojačanim strujanjem prema gore uslijed stražnjeg krila (engl. *upwash*) te vrtlozima koji se odvajaju s krajeva krila, ima veći utjecaj na koeficijent otpora zraka pratećeg vozila.



Slika 16. Postotak promjene veličina u ovisnosti o udaljenosti između odbojnika

Dok su rezultati promjene sile otpora za prateće vozilo u MIRA istraživanju bili za očekivati, ono što iznenađuje je stupanj utjecaja na vodeće vozilo (narančasta linija). Općenito, smanjenje međusobnog razmaka imalo je za posljedicu smanjenje sile otpora i za vodeće vozilo, koje je doživjelo maksimum od 20% smanjenja pri međusobnoj udaljenosti od 1290 mm, dok je za najmanju udaljenost od 290 mm iznosilo 18%. Ovdje bi CFD simulacija pružila bolji uvid u razloge ovakve pojave, ali za pretpostaviti je da se

sam oblik aerodinamičkog traga vodećeg vozila mijenja u zavisnosti o blizini pratećeg vozila tj. njegov oblik i pozicija nisu identični aerodinamičkom tragu samostalnog vozila. Drugi razlog mogao bi biti taj što pramčani tlačni val koji se javlja na prednjem kraju pratećeg vozila, na manjoj međusobnoj udaljenosti više ne gura vodeće vozilo na isti način već je prednji kraj pratećeg vozila uronjen u polje niskog tlaka u aerodinamičkom tragu vodećeg vozila.

Usporedbom vrijednosti za silu otpora vodećeg vozila s F1 rezultatima BAR Honde vidljivo je da je vodeći F1 bolid na međusobnim udaljenostima  $x/L = 0.5$  i 1 gubio 2% tj 4.% sile otpora, dok se interpolirajući rezultate SCSA vozila dobiva iznos od ~13% smanjenja u sili otpora. Uzimajući u obzir oblik F1 bolida razumno je zaključiti da je pramčani tlačni val kod F1 bolida mnogo manje značajan efekt nego što je to kod automobila relativno tupog oblika poput onog SCSA klase. Također, aerodinamički trag F1 bolida je vrlo velik i kompleksan (u usporedbi s onime iza SCSA automobila s zatvorenim kotačima i manjim koeficijentom otpora zraka) te je kao takav vjerojatno manje osjetljiv na utjecaje prisutnosti pratećeg vozila.

Promjena negativnog uzgona na pratećem vozilu (zeleni linija) je skoro linearna te se kreće od 16,4% pri razmaku 3390 mm do 29,3% pri razmaku 290 mm. Usporedbom s rezultatima simulacije pratećeg F1 bolida BAR Honde koji je gubio 34% i 45% negativnog uzgona na međusobnim razmacima  $x/L = 1$  i 0.5, interpolacijom rezultata za SCSA vozilo dolazimo do 20% gubitka na udaljenosti  $x/L = 0.5$  što dovodi do zaključka da je utjecaj međusobnog razmaka na veličinu sile negativnog uzgona znatno manje osjetan nego kod F1 bolida.

Utjecaj međusobnog razmaka na aerodinamički balans pratećeg vozila prikazan je crvenom linijom. Kao osnovna vrijednost uzeto je da SCSA vozilo u samostalnom slučaju ima raspodjelu sile negativnog uzgona 26,5% na prednju osovinu te 73,5% na stražnju osovinu. Dijagram prikazuje postotnu promjenu te osnovne vrijednosti za prednji kraj pratećeg automobila kada se nađe u blizini stražnjeg kraja vodećeg automobila. Vidljivo

je da se pri svim međusobnim razmacima vozila javlja pomak aerodinamičkog balansa prema stražnjoj osovini, a najveći je pri najmanjem razmaku od 290 mm i to 63% dok je najmanji pomak straga bio 21% na udaljenosti 1290 mm. Uspoređujući ove rezultate s F1 analizom BAR Honde koja je pokazala 6% pomak balansa prema stražnjoj osovini čak i pri međusobnom razmaku  $x/L = 8$ , ali i ne veći pomak od 7% straga pri  $x/L = 0.5$  može se zaključiti da smanjenje međusobnog razmaka nije imalo tako drastične posljedice za aerodinamički balans bolida F1.

### 3 Literatura na temu komercijalnih cestovnih vozila

Performanse, upravljanje i sigurnost cestovnih vozila uvelike su određene karakteristikama strujanja zraka oko vozila. Vanjsko opstrujavanje određuje sile i momente u 6 stupnjeva slobode koji doprinose ukupnim performansama vozila. Aerodinamička interferencija između cestovnih vozila ima za rezultat dodatne bočne sile i momente zakretanja oko vertikalnih osi.

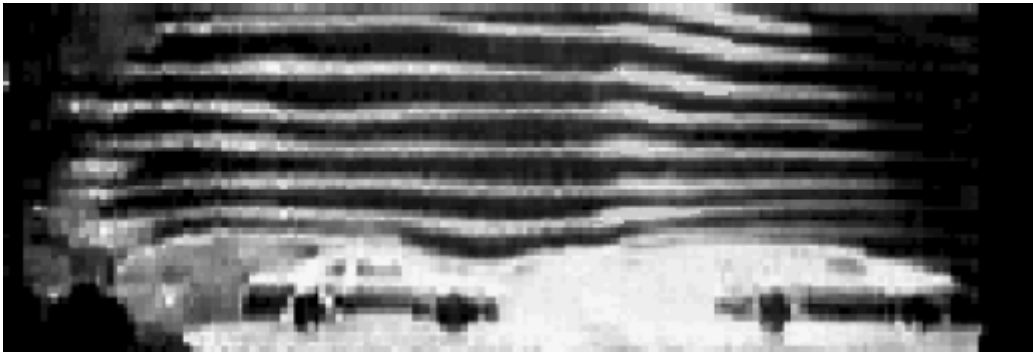
#### 3.1 Götz (1983.)

Jedno od prvih istraživanja aerodinamičke interakcije između dvaju vozila izveo je Götz 1983. godine u kojem je zaključio da za vozila koja se gibaju u koloni brzinom 80 km/h s međusobnim razmakom od 40 m, postoji smanjenje aerodinamičke sile otpora i to za 20% za drugo vozilo u konvoju te oko 30% za treće i svako sljedeće vozilo u konvoju [5].

#### 3.2 Azim i Gawad (2000.)

Eksperimentalno je proučavana interakcija između vozila s realnim karakteristikama strujanja. Analizirano je nekoliko slučajeva uključujući: izolirano vozilo, kolonu vozila, vozila koja se gibaju paralelno te manevar pretjecanja. U eksperimentu su korištena dva modela Mercedes Benz C 280 vozila u mjerilu 1:60 za testiranje efekata *draftinga* i utjecaja Reynoldsova broja na strukture strujanja u prostoru između vodećeg i pratećeg vozila. Modeli su testirani pri dva različita Reynoldsova broja temeljena na duljini modela ( $Re \approx 6000$  i  $Re \approx 11000$ ), no treba uzeti u obzir da su ovo izrazito niske vrijednosti Reynoldsova broja koje nisu reprezentativne za potpuno razvijeno turbulentno strujanje oko vozila.

Za slučaj vožnje u koloni primijećena su tri glavna režima strujanja između vodećeg i pratećeg vozila u ovisnosti o brzini i razmaku vozila: udar vrtložnog traga na prateće vozilo, ustaljeni vrtložni trag i niskotlačna šupljina (ili polje niskog tlaka). Tijekom eksperimenata primijećeno je da se pri razmaku vozila  $x = L$  i  $Re \approx 6000$  s vodećeg vozila odvajaju tangencijalni slojevi te formiraju intermitentne rotirajuće vrtloge koji potom udaraju o prateće vozilo. Nadalje, kako se Reynoldsov broj povećavao prema  $Re \approx 11000$ , odvajajući slojevi sa vodećeg auta ponovno su se spajali na pratećem vozilu te se između vozila stvarala niskotlačna šupljina te se vizualizacijski dim nije nakupljao između vozila što prikazuju Slika 17 i Slika 18.

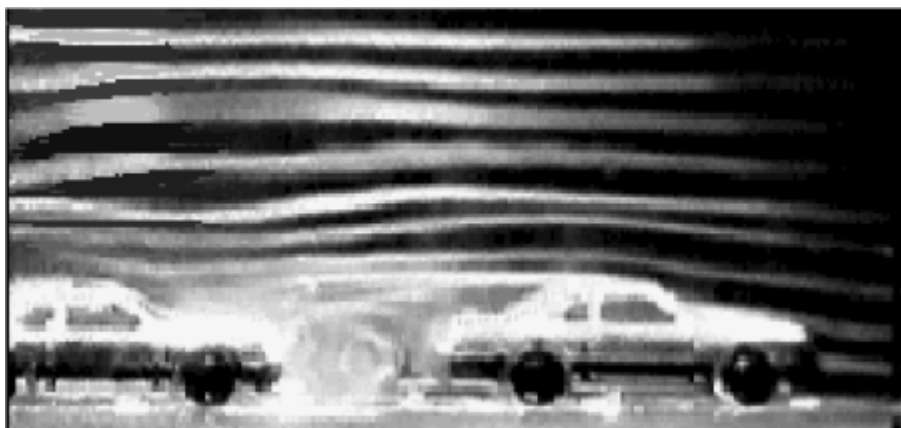


Slika 17. Vizualizacija strujanja pri  $Re \approx 6000$  s razmakom  $x = L$

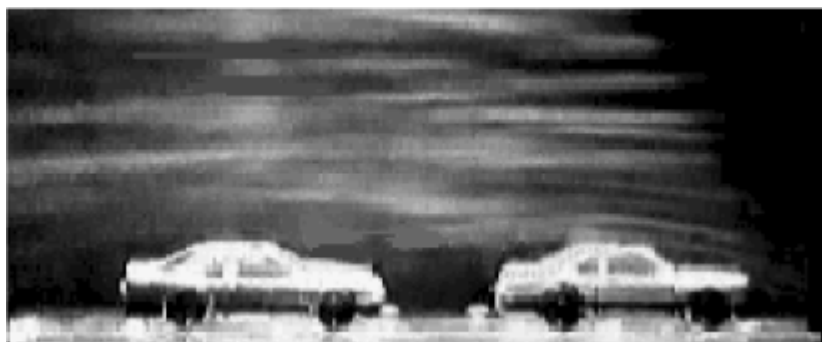


Slika 18. Vizualizacija strujanja pri  $Re \approx 11000$  s razmakom  $x = L$

Na međusobnoj udaljenosti  $x = L / 2$ , odvajajući tangencijalni slojevi s vodećeg vozila formiraju ustaljeni vrtlog pri  $Re \approx 6000$ . Kako se Reynoldsov broj povećavao prema  $Re \approx 11000$ , ustaljeni vrtlog je počeo nestajati kao i u prijašnjem slučaju te se formirala niskotlačna šupljina što prikazuju Slika 19 i Slika 20.

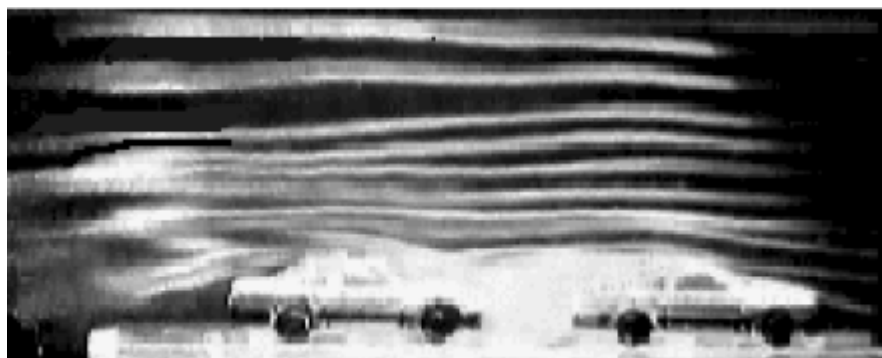


Slika 19. Vizualizacija strujanja pri  $Re \approx 6000$  s razmakom  $x = L/2$



Slika 20. Vizualizacija strujanja pri  $Re \approx 11000$  s razmakom  $x = L/2$

Konačno, na međusobnoj udaljenosti  $x = L/3$ , ponovno se pojavio ustaljeni vrtlog između vozila ali samo pri najvišoj vrijednosti Reynoldsova broja tj.  $Re \approx 11000$  što prikazuju Slika 21. i Slika 22.



Slika 21. Vizualizacija strujanja pri  $Re \approx 8000$  s razmakom  $x = L/3$



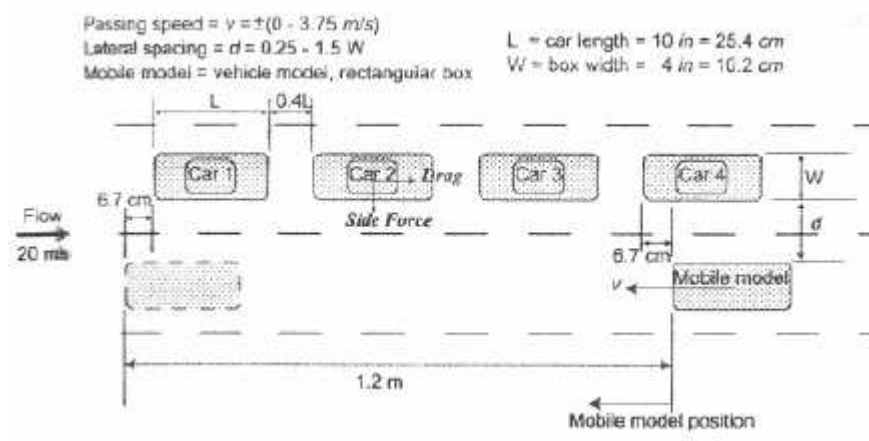


Slika 22. Vizualizacija strujanja pri  $Re \approx 11000$  s razmakom  $x = L / 3$

Iz eksperimenata s malim razmakom između vozila ustanovljeno je da prateće vozilo postiže znatno smanjenje sile otpora. Također, ustanovljeno je da je niskotlačna šupljina odgovorna za najveće smanjenje sile otpor, pošto je prednji kraj pratećeg modela potpuno zadubljen u navedeno područje [6].

### 3.3 Tsuei i Savas (2001.)

Istraživali su nestacionarne aerodinamičke pojave u koloni četiri vozila tijekom manevara preticanja i longitudinalnih pravocrtnih oscilacija individualnih vozila unutar kolone. Korišten je model vozila koji se gibao pravocrtno paralelno s kolonom četiri vozila s ciljem simuliranja manevara preticanja prema Slika 23.



Slika 23. Konfiguracija konvoja i pokretnog modela prema Tsuei i Savas (2001.)

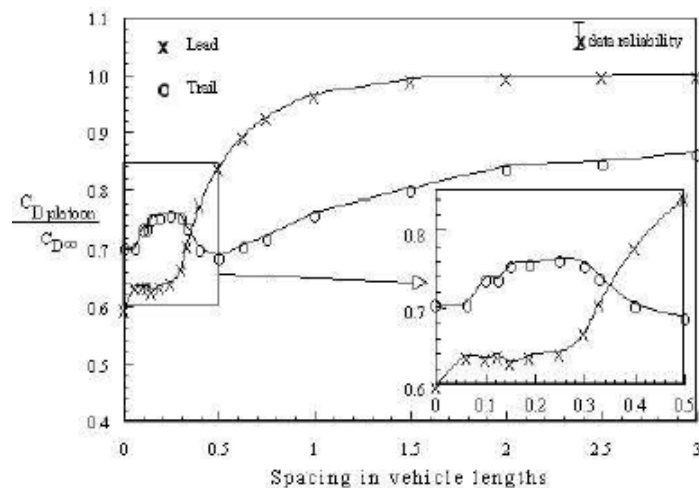
Iz eksperimenata su saznali da svako od vozila u koloni osjeća odbojnu bočnu silu kada se pokretno vozilo nalazi u okolini njihovog stražnjeg kraja, te da se ova sila postupno pretvara u privlačnu bočnu silu kako se pokretno vozilo približava njihovom prednjem

kraju. Također, zaključili su da svako od vozila u koloni doživljava povećanje sile aerodinamičkog otpora kako se pored njih kreće pokretno vozilo tijekom preticanja. Dodatno, isti trendovi javljali su se kada cijela kolona pretiče nepokretno vozilo.

Za slučaj kolone četiri vozila prodiskutirane su varijacije u sili otpora svakog od vozila susjednih onome koje longitudinalno oscilira oko svoje pozicije. Zaključeno je da za slučaj kada se oscilirajuće vozilo pomiče prema vozilu ispred sebe tada koeficijent otpora zraka pomičnog vozila i onoga iza njega raste, dok je vozilo ispred oscilirajućeg vozila postizalo minimalne vrijednosti koeficijenata otpora zraka. Ovi utjecaji na koeficijent otpora zraka bili su suprotni za slučaj kada se oscilirajuće vozilo pomicalo prema natrag. Tsuei i Savas također su istraživali utjecaje relativne brzine između vozila u konvoju i vozila koje pretiče konvoj. Pronašli su da za manje relativne brzine postoji povećanje sila koje djeluju na vozila u konvoju i to do 70% za silu otpora zraka te do 60% za bočnu silu [7].

### 3.4 Zabat et. al. (1994.)

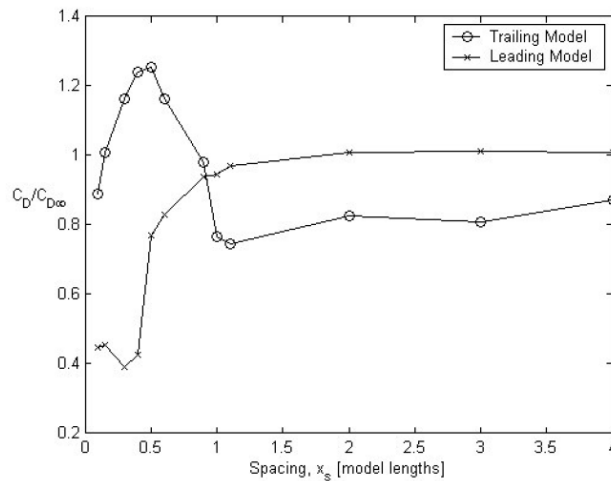
Istraživali su utjecaje međusobnog razmaka vozila na koeficijente otpora zraka koristeći tipične geometrije mini-kombija. Iz svojih eksperimenata pronšli su da oba vozila (vodeće i prateće) doživljavaju smanjenje sile otpora zraka kada se kreću na malim međusobnim razmacima. Vodeći model imao je veće smanjenje sile otpora dok je smanjenje sile otpora na pratećem modelu imalo jednolik trend s promjenom razmaka. Uočili su da na malim razmacima unutar područja  $0 < x / L < 0.35$  (gdje je  $x$  razmak,  $L$  duljina korištenog modela), prateći model ima veće koeficijente otpora zraka od vodećeg modela. Unutar spomenutog raspona, koeficijent otpora zraka pratećeg modela dosezao je maksimum od 76% te minimum od 69% vrijednosti koeficijenta otpora zraka samostalnog modela vozila [8]. Slika 24 prikazuje navedenu zavisnost.



Slika 24. Promjena koeficijenta sile otpora za dva mini-kombija na malim razmacima

### 3.5 Watkins i Vino (2004.)

Izvodili su eksperimente u svrhu razumijevanja utjecaja međusobnog razmaka vozila na dva Ahmedova modela. Pronađeno je značajno povećanje sile otpora zraka na prateći model pri malim razmacima između vozila. Također, primijećeno je da oba modela mogu doživjeti znatno povećanje sile otpora zraka na malim međusobnim razmacima. Slika 25. prikazuje ovisnost koeficijenta otpora zraka o međusobnom razmaku za oba modela.



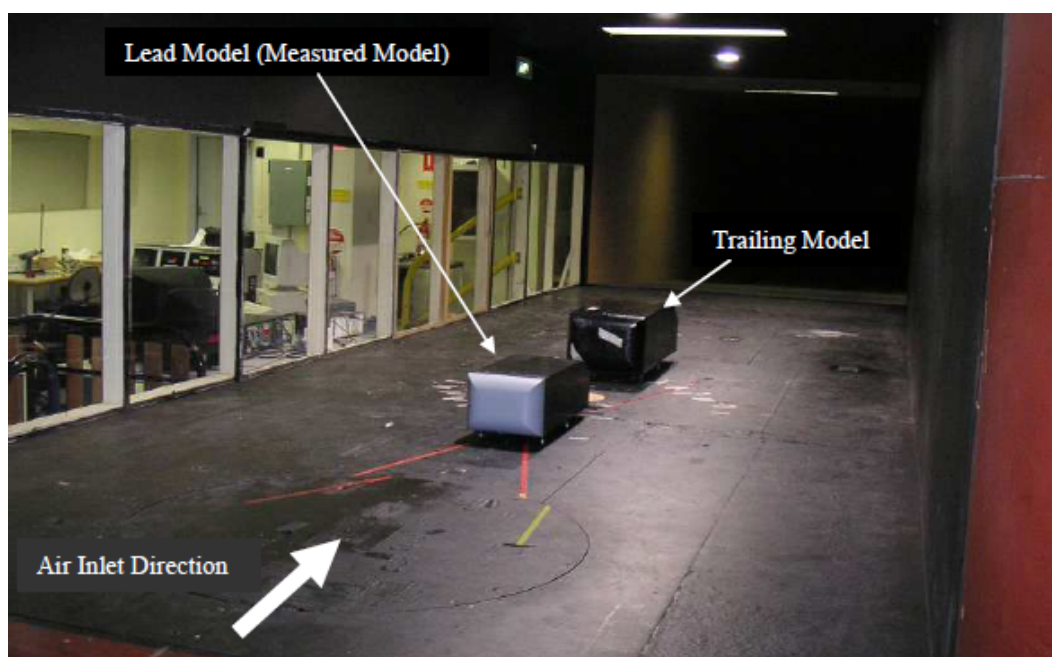
Slika 25. Utjecaji međusobnog razmaka vozila na koeficijente otpora zraka

Zaključili su da je interakcija vrtloga u tragu vodećeg vozila s pratećim vozilom primarni izvor povećanja sile otpora pratećeg modela na malim međusobnim razmacima vozila te

predložili da je potrebno veće razumijevanje u svrhu detaljnije analize njihovih utjecaja [9].

### 3.6 Rajamani, Watkins, Vino, Pagliarella (2006.)

Eksperimentalno istraživanje u RMIT industrijskom zračnom tunelu provedeno je na dva Ahmedova tijela različitih dimenzija. Prvi, vodeći model bio je u mjerilu M0.75:1 originalnog Ahmedovog tijela dok je prateći model bio M1:1, oba s nagibom stražnje površine od  $30^\circ$ .

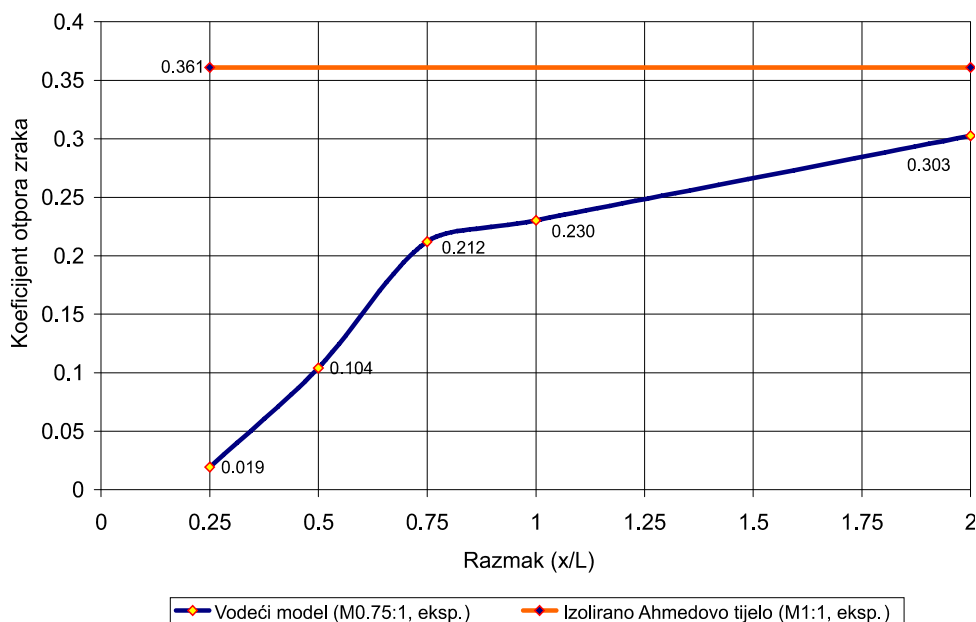


Slika 26. Postav eksperimenta u RMIT IZT

Modeli su bili smješteni u zračnom tunelu te je varirana njihova međusobna udaljenost od  $x/L = 0.25$  do 2, pri čemu je  $L$  referentna duljina modela od 1,044 m. Mjerna oprema smještena je samo u vodećem (prednjem) modelu te su aerodinamički koeficijenti (samo otpor) mjereni samo za vodeće tijelo.

Nakon prethodnog istraživanja Vino i Watkinsa prema [9] na dva M1:1 modela s  $30^\circ$  nagibima stražnjih površina, trenutno istraživanje iz nepoznatih razloga nastavljeno je s dva modela različitih mjerila, prvog tj. vodećeg u mjerilu M0.75:1 te pratećeg u M1:1. Eksperimenti su izvršeni pri brzini strujanja od 30 m/s što odgovara Reynoldsovom

broju  $1,55 \cdot 10^6$  temeljenom na duljini modela kao referentnoj vrijednosti. Slika 27. prikazuje ovisnost koeficijenta sile otpora zraka za vodeći model pri varijaciji razmaka između modela. Sve vrijednosti uzete su kao prosjek nekoliko mjerenja.



Slika 27. Utjecaj promjene međusobnog razmaka Ahmedovih modela na koeficijent otpora zraka vodećeg modela

Autor kao razlog mjerenja koeficijenata aerodinamičkih sila samo na jednom modelu navodi neadekvatnost softvera mjernog uređaja tj. njegovu nemogućnost prikupljanja podataka s dva modela istovremeno.

Prisustvo pratećeg modela vidljivo je iz smanjenja sile otpora proporcionalno sa smanjenjem međusobnog razmaka dvaju modela (Slika 27). Na vrlo malom razmaku od  $x/L = 0.25$ , koeficijent otpora zraka vodećeg modela je  $\sim 95\%$  manji od onoga za samostalni model. Koeficijent otpora zraka iznosi 0,212 pri  $x/L = 0.75$  te postaje sve manje osjetljiv na međusobni razmak dvaju vozila nakon navedene udaljenosti te se postupno povećava do 0,303 pri  $x/L = 2$ .

Unutar područja  $0.25 < x/L < 2$ , sila otpora vodećeg modela ostaje značajno manja nego za slučaj samostalnog modela. Glavni uzrok ovoj pojavi pripisuje se povećanju pritiska u stražnjem dijelu vodećeg modela zbog prisutnosti pratećeg modela u njegovom

aerodinamičkom tragu. Drugi istraživači otkrili su da je povoljno smanjenje sile otpora vodećeg modela u koloni 2D cilindara uzrokovano prisutnošću pratećih tijela u aerodinamičkom tragu vodećeg tijela, koja opstruiraju putanju energetski snažnih vrtloga koji se tamo inače nalaze [10]. Ovaj postav 2D cilindara analogan je konvoju Ahmedovih tijela istraživanih u ovome radu pošto se oboje smatraju aerodinamički „tupim“ tijelima te iz tog razloga stvaraju neku vrstu fenomena odvajanja visokoenergetskih vrtloga.

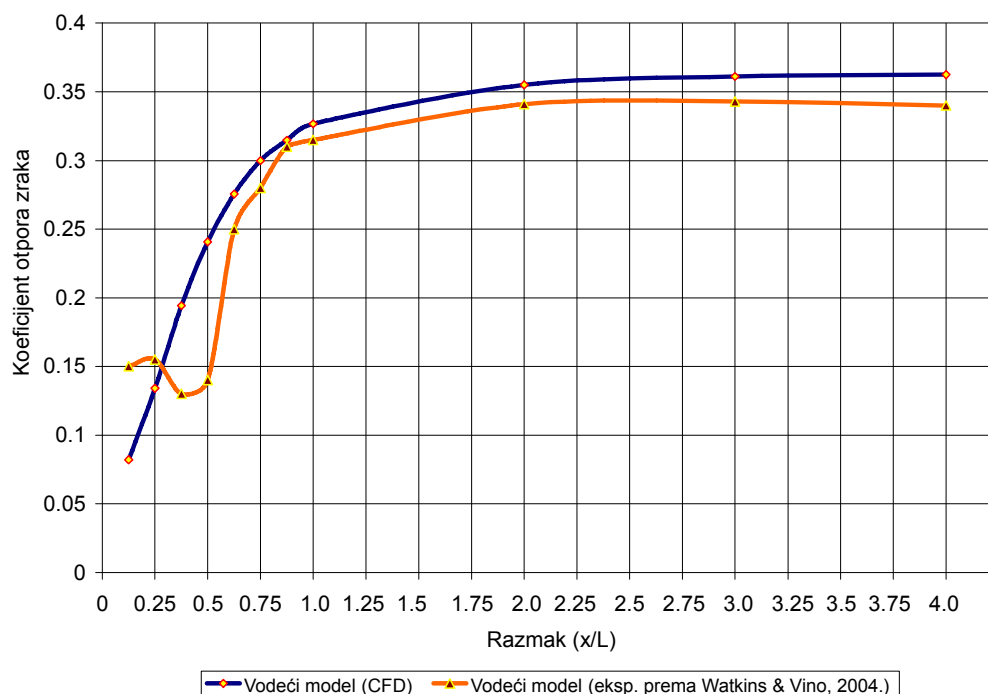
Glavni izvor aerodinamičkog otpora na Ahmedovom tijelu sa stražnjim krajem nagnutim pod  $30^\circ$  jest par pratećih protusmjerno rotirajućih vrtloga koji se odvajaju s C-stupova modela. Ovi vrtlozi sadrže znatne količine kinetičke energije te stoga osjetno smanjuju tlak u pozadini vozila. Pri malim međusobnim razmacima vozila, snaga ovih vrtloga s C-stupova vodećeg modela se smanjuje kako se kinetička energija vrtloga troši pri udarima u prateći model koji se nalazi u aerodinamičkom tragu. Ovo za posljedicu ima povećanje tlaka u stražnjem predjelu vodećeg modela te mu smanjuje koeficijent otpora zraka. Kako se međusobni razmak vozila postupno povećava te prepreka vrtlozima koji se odvajaju s vodećeg modela nestaje, oni opet dobivaju na snazi te smanjuju tlak u stražnjem predjelu vodećeg modela te se time povećava koeficijent aerodinamičkog otpora.

### 3.7 Rajamani (2006.)

#### 3.7.1 Vodeće vozilo

U ovome radu utjecaji *draftinga* validirani su računalnom dinamikom fluida te uspoređeni s eksperimentalnim rezultatima prema [9] izvedenim na dva Ahmedova tijela u originalnom mjerilu u RMIT University industrijskom zračnom tunelu. U eksperimentu su korištena dva modela Ahmedovog tijela s nagibom stražnje površine od  $30^\circ$ . Međusobni razmak modela mijenjan je na temelju referentne duljine  $L$  Ahmedovog tijela (1,044 m) i to u području  $x = 0.125L$  do  $x = 4L$ . Ulazna brzina strujanja zraka u

zračnom tunelu bila je 35 m/s što odgovara Reynoldsovom broju od  $2,3 \cdot 10^6$  temeljenom na duljini modela. Usporedbu rezultata numeričke analize i eksperimenta za vodeći model prikazuje Slika 28.



Slika 28. Utjecaj međusobnog razmaka vozila na  $C_d$  vodećeg vozila

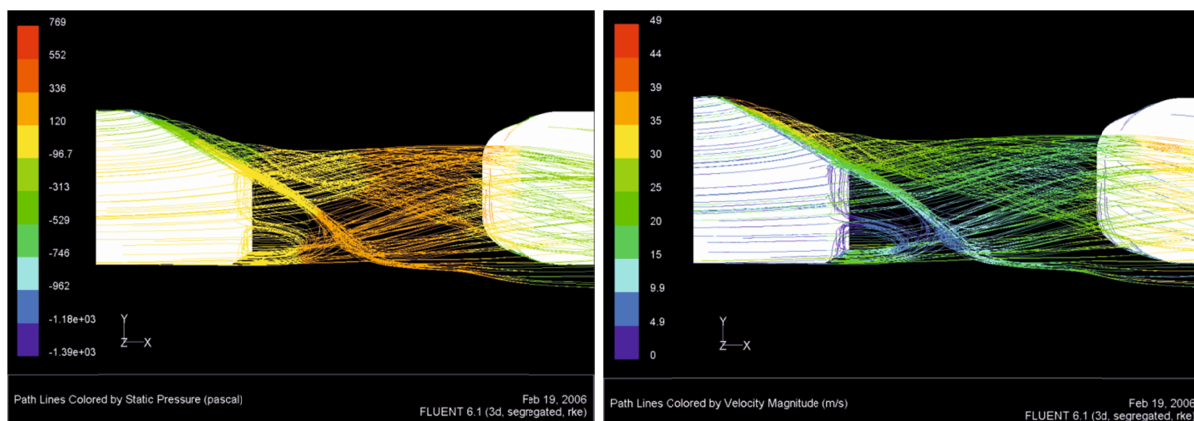
Moguće je uočiti podjednak trend u rezultatima eksperimenta i numeričkim rezultatima. Na malim međusobnim razmacima između  $x/L = 0.125$  i  $x/L = 1$ , korak povećanja pomaka bio je  $0.125L$ . Pronađeno je da je koeficijent otpora zraka vodećeg modela pri numeričkoj analizi bio skoro 70% manji nego kod slučaja samostalnog modela, dok je u eksperimentu on bio 55% manji. Glavni razlog ovako niskoj vrijednosti koeficijenta otpora jest manjak snažnih vrtloga s C-stupova modela koji se javljaju pri nagibu stražnje površine od  $30^\circ$ , a pri ovako malom međusobnom razmaku modela ne postoje. Pošto prateće vozilo povećava tlak u stražnjem dijelu vodećeg vozila, sav tlak koji bi se inače izgubio uslijed separacije strujanja vraća se natrag vodećem vozilu što uzrokuje smanjenje otpora zraka uslijed razlike tlakova prednjeg i stražnjeg dijela vozila. Iz eksperimentalnog istraživanja zaključeno je da se smanjenje koeficijenta otpora vodećeg

modela osjeti pri međusobnim razmacima vozila između  $0.125 < x / L < 1$  , a prema kasnijoj numeričkoj studiji pri  $0.125 < x / L < 2$  .

Utjecaji na vodeće vozilo izvan ovog raspona razmaka mijenjaju se postupno, tj. koeficijent otpora zraka vodećeg vozila počinje se povećavati s povećanjem međusobnog razmaka vozila. Ovakvo blago povećanje utjecaja primijećeno je u eksperimentu za razmake vozila između  $1 < x / L < 4$  te pri numeričkoj analizi za  $2 < x / L < 4$  . Nakon međusobnih udaljenosti  $x / L = 1$  za eksperiment te  $x / L = 2$  za numeričku analizu, koeficijent otpora zraka vodećeg vozila postaje skoro konstantan zato što prateće vozilo više nije dovoljno blizu da pozitivno utječe na povrat tlaka na stražnjoj površini vodećeg vozila. Iz ovog razloga koeficijent otpora zraka pri većim međusobnim razmacima teži onome za izolirani model, što je primijećeno i u eksperimentalnoj i numeričkoj analizi.

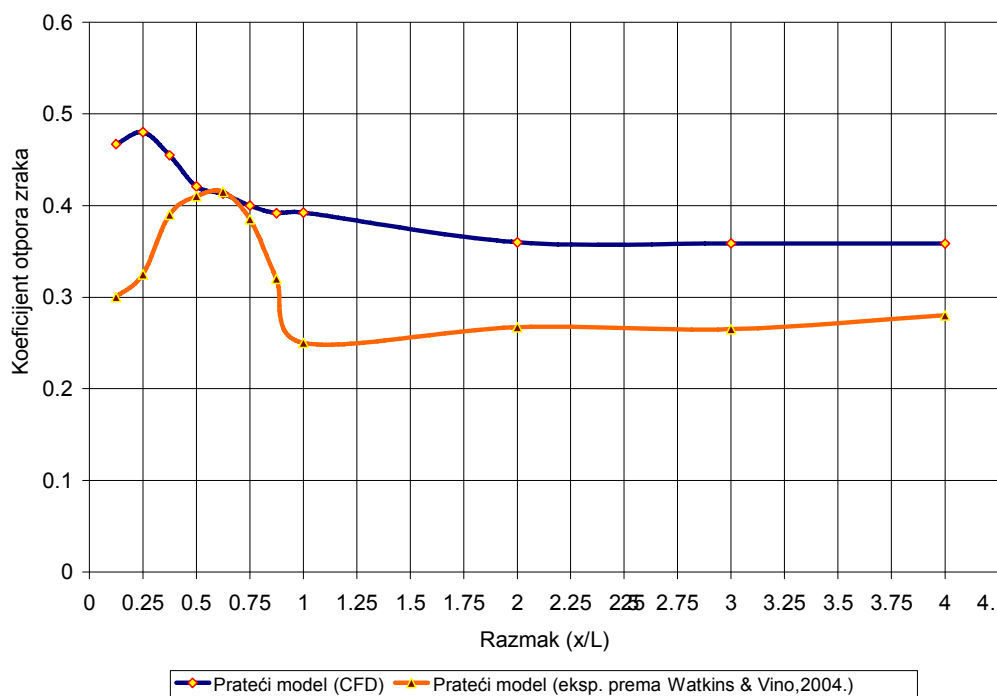
### 3.7.2 Prateće vozilo

Pri malim međusobnim razmacima vozila, utjecaji razmaka na prateće vozilo bili su obrnuti od onih na vodeće vozilo, pošto je koeficijent otpora zraka za prateće vozilo bio veći nego pri slučaju izoliranog Ahmedovog modela. Razlog povećanja koeficijenta otpora zraka pratećeg vozila pri malim međusobnim razmacima jest udaranje odvojenih vrtloga sa vodećeg vozila u prednji dio pratećeg vozila. Ovu interakciju pokazuje Slika 29.



Slika 29. Udaranje strujanja u prateći model i povrat tlaka vodećeg modela pri  $x / L = 0.25$





Slika 30. Utjecaj međusobnog razmaka vozila na  $C_d$  pratećeg vozila

Za vrlo mali međusobni razmak vozila ( $x / L = 0.125$ ), koeficijent otpora zraka pratećeg vozila je 0,323 (eksperiment) te 0,467 (numerička analiza). Ovakvi rezultati donekle su očekivani pošto na tako malom razmaku nije za očekivati postojanje velikih vrtloga bogatih kinetičkom energijom jer u prostoru između vozila postoji polje niske brzine strujanja.

Iznenadujuća je činjenica da s povećanjem međusobnog razmaka vozila dolazi do povećanja sile otpora na prateći model što potvrđuju i eksperiment i numerička analiza. Dapače, promatrane vrijednosti koeficijenta otpora zraka prelaze one za slučaj samostalnog vozila i ostaju iznad te vrijednosti kroz cijelo područje  $0.15 < x / L < 0.9$  (eksperiment) te  $0.125 < x / L < 1$  (numerička analiza). Koeficijent otpora zraka poprima svoju maksimalnu vrijednost na razmaku  $x / L = 0.5$  (eksperiment) te iznosi 0,421 dok se pri numeričkoj analizi javlja na razmaku  $x / L = 0.25$  te iznosi 0,480. Iako je prema [6] bilo za očekivati udaranje vrtloga koji se odvajaju s vodećeg vozila u frontalno područje pratećeg vozila, autori također govore da smanjenje sile otpora na prateće vozilo neće biti tako povoljno kao u situaciji kada se između vozila nalazi čista

niskotlačna šupljina ali da će postojati. Međutim, iz rezultata eksperimenta vidljivo je da smanjenje sile otpora postoji samo za udaljenosti veće od  $x / L = 0.5$  i to sa minimalnom vrijednošću koja iznosi 0.25 pri  $x / L = 1$ .

Autor kao objašnjenje odstupanja numeričke analize i eksperimenta navodi krive postavke referentnog modela u eksperimentu, u kojemu se model držao na jednom potpornju što je rezultiralo velikim oscilacijama cijelog modela pri mjerenju sile otpora te povećanjem turbulentnosti strujanja oko samog modela.

## 4 Aerodinamika vozila

Tijekom 20. stoljeća zahtjevi poput estetike i jednostavnosti izrade uvelike su diktirali i ograničavali aerodinamičare u njihovim pokušajima smanjivanja koeficijenta otpora zraka cestovnih vozila. Drastična promjena nastupiti će tek u listopadu 1973. godine kada će zemlje OPEC-a zajedno sa Egiptom, Tunisom i Sirijom uvesti embargo na naftu. Tijekom embarga koji je trajao do ožujka 1974. godine, cijena barela nafte porasla je sa 3\$ na 12\$ dok je proizvodnja pala. Posljedica ove „prve naftne krize“ bila je ta da se odjednom veliki značaj pridaje aerodinamičkom dizajnu vozila te smanjivanju otpora zraka čija je posljedica smanjenje potrošnje goriva koje postaje glavna stavka oglašavanja i prodaje vozila [11].

S druge strane, konstruktori natjecateljskih automobila od samog početka shvaćali su važnost utjecaja aerodinamičkog otpora na performanse automobila. U prvoj polovini 20. stoljeća ovo je bila jedina stvar koju su poznavali iz područja aerodinamike. Smanjivanje otpora sastojalo se od smanjivanja poprečnog presjeka tj. čeoine površine automobila na njezin praktični minimum i pokušaja poboljšanja aerodinamičnosti (engl. *streamlining*) svega što je ostalo stršati u zraku [12]. Aerodinamičnost određenih komponenti većinom je postizana intuicijom i eksperimentalnim metodama. Većina pokušaja da se postigne aerodinamičan oblik tijela nije u potpunosti zadovoljila jer, dok bi automobil bio brz pri pravocrtnom gibanju, bio je zasigurno teži i imao loše dinamičke osobine u zavojima. U '60-im godinama 20. stoljeća konstruktori su počeli shvaćati da je aerodinamički uzgon barem jednako važan kao i otpor, te je počela trenutna era aerodinamike natjecateljskih automobila. Razvoj automobila je od tada prošao kroz mnoge faze, od prvih spojlera i raznih klinastih oblika tijela automobila, do prvih obrnutih krila pa čak i Jim Hallovog Chaparral 2J "usisavača"<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup> Chaparral 2J bio je među prvim uspješnim *ground effect* automobilima. Imao je pragove od Lexana oko  $\frac{3}{4}$  svoga opsega (osim na prednjoj strani) koji su bili integrirani s ovjesom tako da su uvijek održavali

## 4.1 Aerodinamika i karakteristike strujanja

Aerodinamika je primijenjena znanost koja ima mnoge uporabne svrhe u strojarstvu. Ciljevi aerodinamike, bila ona teorijska, numerička ili eksperimentalna, su prema [13]:

1. Određivanje sila, momenata i količine prenesene topline na tijela koja se gibaju kroz fluid (obično zrak), te karakteristika samog strujanja – pošto se obično radi o opstrujavanju (vanjskom strujanju) fluida oko tijela, ovu granu nazivamo vanjska aerodinamika (engl. *external aerodynamics*).
2. Određivanje karakteristika strujanja kroz cijevi i kanale – radi se o protjecanju (unutarnjem strujanju) te se ova grana naziva unutarnja aerodinamika (engl. *internal aerodynamics*).

### 4.1.1 Viskozno i neviskozno strujanje

Pri gibanju molekula fluida one sa sobom transportiraju masu, količinu gibanja i energiju sa jednog mjesta na drugo. Ovaj transport na molekularnoj razini je razlog postojanja fenomena difuzije mase, viskoznosti (trenja) i toplinske provodnosti. Sva realna strujanja pokazuju efekte ovih transportnih fenomena te se nazivaju *viskozna strujanja* (engl. *viscous flows*). Za razliku od njih, strujanja za koja se pretpostavlja da ne uključuju trenje, toplinsku provodnost, ili difuziju nazivaju se *neviskozna strujanja* (engl. *inviscid flows*). Neviskozna strujanja ne postoje u prirodi, ali u aerodinamici postoji više realnih strujanja za koja su transportni fenomeni dovoljno maleni da se ona mogu dovoljno točno aproksimirati neviskoznim modelom strujanja. Strujanja oko tupih tijela (poput automobila) karakterizirana su velikom prisutnošću odvajanja strujanja

---

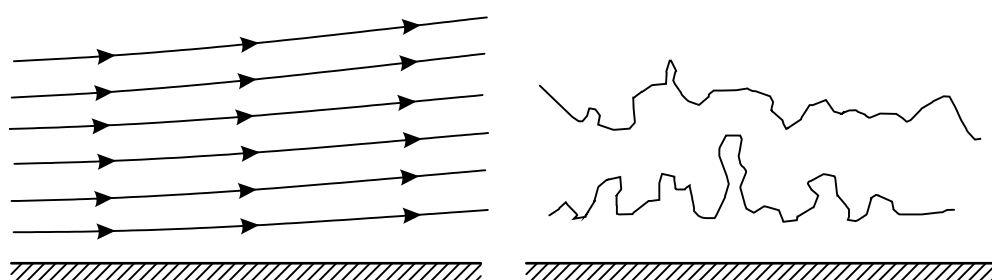
udaljenost 1 inč od površine ceste, time stvarajući zonu u kojoj su dva 17 inčna JLO ventilatora pogonjena dvotaktnim motorom snage 45 ks mogla stvarati djelomični podtlak. Ovaj podtlak je pružao 2J-u negativni uzgon (engl. *downforce*) u vrijednosti 1,25–1,50g, što je ovome automobilu omogućavalo izvanredne vozne karakteristike pri svim brzinama. Većina aerodinamičkih sredstava za postizanje negativnog uzgona u direktnoj je ovisnosti o brzini vožnje tj. nastrujavanja fluida, dok je Chaparralov "usisavač" imao izvanredne performanse i pri nižim brzinama vožnje.

(engl. *flow separation*) i vrtloga u tragu iza tijela (engl. *wake*), koji su primarno posljedica viskoznih efekata, te se takvo strujanje mora tretirati kao viskozno.

Jednadžbe koje opisuju viskozno strujanje fluida nazivaju se Navier-Stokesove jednadžbe, dok se izjednačavanjem članova koji sadrže viskoznost s nulom dobivaju tzv. Eulerove jednadžbe koje opisuju neviskozno strujanje.

#### 4.1.2 Laminarno i turbulentno strujanje

Laminarno strujanje definirano je kao ono strujanje u kojem se čestice fluida gibaju pravilno u slojevima, a putanje čestica su glatke krivulje. Turbulentno strujanje izrazito je nestacionarno strujanje u kojemu se čestice fluida gibaju po vrlo nepravilnim putanjama i intenzivno se miješaju, a brzina, tlak i ostale veličine pokazuju stohastičko ponašanje [14].



Slika 31. Putanje čestica fluida u laminarnom i turbulentnom režimu strujanja

Ključnu ulogu pri prijelazu režima strujanja iz laminarnog u turbulentno ima odnos inercijskih i viskoznih sila. Trenje koje se javlja između čestica fluida i površine odgovorno je za nedostatak klizanja (engl. *no-slip*) u dodiru između površine tijela i prvog sloja fluida, tj. na samoj mirujućoj površini tijela brzina fluida jednaka je nuli, a s udaljenošću od stijenke postepeno raste sve do postizanja brzine neporemećenog strujanja (engl. *free stream velocity*) na rubu graničnog sloja.

Pošto se viskozno strujanje u prirodi pojavljuje u oba oblika, glavni pokazatelj hoće li se realizirati kao laminarno ili turbulentno je Reynoldsov broj. Reynoldsov broj jedan je od najvažnijih bezdimenzijskih parametara u aerodinamici, a označuje omjer inercijskih i

viskoznih sila u fluidu, te je glavni kriterij prijelaza laminarnog u turbulentno strujanje fluida.

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot v_{\infty} \cdot l}{\mu} \quad (4.1)$$

Re	(-)	Reynoldsov broj
$\rho$	(kg/m <sup>3</sup> )	gustoća fluida
$v_{\infty}$	(m/s)	brzina neporemećenog strujanja
$l$	(m)	karakteristična duljina prepreke
$\mu$	(Pa · s)	dinamička viskoznost fluida

Laminarno strujanje fluida postoji samo pri niskim vrijednostima Reynoldsovog broja gdje je utjecaj viskoznosti velik, dok velike vrijednosti Reynoldsovog broja karakteriziraju mali utjecaj viskoznosti te se viskozne sile mogu zanemariti u odnosu na inercijske u većem dijelu područja strujanja. Mjesto gdje se utjecaj viskoznih sila nikako ne smije zanemariti jest u blizini čvrste nepropusne stijenke koja se nalazi u području strujanja. To područje naziva se granični sloj (engl. *boundary layer*) te je u njemu dominantan utjecaj viskoznih sila, dok je utjecaj inercijskih sila malen.

Referentna duljina  $l$  za definiranje vrijednosti Reynoldsovog broja za automobile je, po SAE konvenciji, jednaka osovinskom razmaku vozila [15]. Za vozila ispitivana u ovom radu osovinski razmak je  $l = 2,237$  m, gustoće zraka  $\rho = 1,225$  kg/m<sup>3</sup>, te dinamičke viskoznosti zraka  $\mu = 1,7894 \cdot 10^{-5}$  Pa · s, pa je vrijednost Reynoldsovog broja jednaka

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot v_{\infty} \cdot l}{\mu} = \frac{1,225 \cdot 40 \cdot 2,370}{1,7894 \cdot 10^{-5}} = 6,49 \cdot 10^6 \quad (4.2)$$

Za vrijednosti  $\text{Re} > 500\,000$  može se tvrditi da se kod strujanja oko automobila radi o potpuno razvijenom turbulentnom strujanju [11].

#### 4.1.3 Stlačivo, nestlačivo strujanje i Machov broj

Strujanje u kojem je gustoća fluida  $\rho$  konstantna naziva se nestlačivim strujanjem (engl. *incompressible flow*), za razliku od strujanja s promjenjivom gustoćom koje se naziva

stlačivim (engl. *compressible flow*). Sva strujanja u prirodi su u manjoj ili većoj mjeri stlačiva, dok pravo nestlačivo strujanje gdje bi gustoća bila konstantna ne postoji. Međutim, analogno primjeru viskoznog i neviskoznog strujanja, postoji velik broj aerodinamičkih problema koji mogu biti aproksimirani nestlačivim strujanje s dovoljnom točnošću.

Na primjer, strujanje homogene kapljevine u većini slučajeva smatra se nestlačivim, te se za većinu problema hidrodinamike pretpostavlja  $\rho = \text{konst.}$

Machov broj je bezdimenzijska veličina koja predstavlja omjer lokalne brzine strujanja fluida i lokalne brzine zvuka. Ime je, na prijedlog Švicarskog inženjera zrakoplovstva Jakoba Ackereta<sup>4</sup>, dobio prema Austrijskom fizičaru Ernestu Machu. Definicija Machova broja je:

$$\text{Ma} = \frac{v_{\infty}}{a_{\infty}} \quad (4.3)$$

Ma	(-)	Machov broj
$v_{\infty}$	(m/s)	brzina strujanja fluida
$a_{\infty}$	(m/s)	brzina zvuka u fluidu

Strujanje se prema Machovom broju može generalno podijeliti u četiri skupine:

- Podzvučno strujanje ( $\text{Ma} < 1$  svugdje). Ovo strujanje karakterizirano je glatkim strujnicama bez diskontinuiteta. Štoviše, pošto je brzina strujanja svugdje manja od brzine zvuka, bilo kakav poremećaj strujanja propagira uzvodno i nizvodno kroz cijelo polje strujanja. Ako je brzina strujanja blizu  $\text{Ma} = 1$ , tada strujanje lokalno (pri ekspanziji oko tijela) može prijeći u nadzvučni režim. Pravilo je da mora biti  $\text{Ma} < 0,8$  da bi se održavalo podzvučno strujanje oko glatkih aerodinamičnih tijela,

---

<sup>4</sup> Ackeret je sudjelovao u rješavanju praktičnih inženjerskih problema vezanih uz dizajn propelera varijabilnog nagiba za zrakoplove i brodove. Doprinio je istraživanju nadzvučnih aeroprofila te je vodio prve pokušaje proračuna sila otpora i uzgona na nadzvučnim aeroprofilima, kada je i predložio da se uvede oznaka Machovog broja kao višekratnik brzine zvuka [28].

dok za tupa tijela  $Ma$  mora biti još niži da bi se u svakoj točki osiguralo podzvučno strujanje.

➤ Krozzvučno strujanje ( $0,8 < Ma < 1,2$ ). Ako je strujanje dovoljno blizu  $Ma = 1$  tada se lokalno pojavljuju područja nadzvučnog strujanja preko površina tijela koja završavaju tlačnim valovima te povratkom u podzvučni režim strujanja. Pošto ovakva strujanja pokazuju karakteristike podzvučnog i nadzvučnog strujanja, nazivaju se krozzvučnima.

➤ Nadzvučno strujanje ( $Ma > 1$  svugdje). Karakterizirano je prisutnošću tlačnih valova u kojima strujnice i svojstva fluida imaju diskontinuitete. Česta pojava su valovi širenja na stražnjim dijelovima tijela.

➤ Hiperzvučno strujanje ( $Ma > 5$ ). Karakterizirano je pomicanjem tlačnih valova bliže stijenkama tijela, te njihovim jačanjem što dovodi do lokalnog povišenja temperature u području između tlačnog vala i tijela. Ako je  $Ma$  dovoljno velik, sloj tlačnog vala postaje sve tanji i dolazi do interakcije s graničnim slojem na površini tijela. Postizanjem dovoljno visoke temperature u sloju tlačnog vala dolazi i do kemijskih reakcija u kojima se molekule kisika i dušika cijepaju tj. disociraju. Kada  $Ma$  naraste dovoljno da se ove pojave realiziraju, govorimo o hiperzvučnom strujanju.

Kao pravilo uzima se da strujanje možemo smatrati nestlačivim za vrijednosti Machovog broja  $Ma < 0.3$ . Pošto je najviša brzina strujanja razmatrana u aerodinamici cestovnih i natjecateljskih vozila  $120 \text{ m/s}^5$  što rezultira  $Ma = 0,35$ , model nestlačivog strujanja dovoljno je dobra aproksimacija čak i za ovaj ekstremni slučaj. Međutim, ispitivanja aerodinamike vozila u zračnim tunelima najčešće se izvode pri neporemećenoj brzini strujanja  $v_\infty = 40 \text{ m/s}$  koja je korištena i u ovome radu, te je model nestlačivog strujanja primjeren za ovaj tip problema.

---

<sup>5</sup> Bugatti Veyron 16.4 Super Sport World Record Edition s brzinom od 431.072 km/h.



Prema iznesenim klasifikacijama aerodinamičkih strujanja, promatrani slučaj opstrujavanja fluida oko vozila spada u probleme vanjske aerodinamike, a opisuje ga nestlačivo, viskozno, turbulentno strujanje.

## 4.2 Aerodinamičke sile i momenti

Aerodinamičke sile i momenti na tijelo oko kojeg opstrujava fluid posljedica su [13]:

- *raspodjele tlaka* po površini tijela i
- *raspodjele smične sile* po površini tijela.

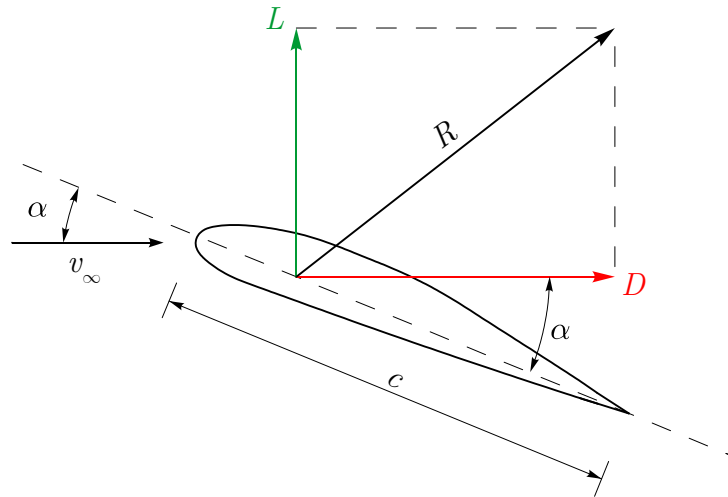
Kao što znamo, tlak  $p$  predstavlja normalno naprezanje na površinu, dok smično naprezanje  $\tau$  djeluje tangencijalno na površinu. Smično naprezanje je direktna posljedica viskoznosti fluida, odnosno viskoznog trenja između čestica fluida međusobno i između tijela i čestica fluida.

Rezultantna sila na tijelo je integral tlaka  $p$  i smičnog naprezanja  $\tau$  po površini tijela.

Rezultantna sila  $R$  se može podijeliti u dvije komponente:

- $L = \text{uzgon}$  (engl. *lift*) je komponenta sile  $R$  okomita na smjer brzine neporemećenog strujanja  $v_\infty$  i
- $D = \text{otpor}$  (engl. *drag*) je komponenta sile  $R$  paralelna s brzinom neporemećenog strujanja  $v_\infty$ .

Napadni kut  $\alpha$  definiran je kao kut između tetive aeroprofila  $c$  (ili simetrale tijela) i smjera neporemećenog strujanja  $v_\infty$ . Slika 32. prikazuje navedene sile i geometrijske odnose.



Slika 32. Rezultantna aerodinamička sila i njezine komponente

Mehanika fluida, a time i aerodinamika, je teorijsko-eksperimentalna znanost, unutar koje se dugi niz godina do rezultata dolazilo eksperimentom. Eksperiment se može vršiti u originalnoj pojavi (prototipu) ili u modelskoj pojavi (modelu). Dimenzijska analiza i teorija sličnosti predstavljaju temelj eksperimentalnom istraživanju složenih fizikalnih pojava u raznim područjima fizike, a njihovom primjenom smanjuje se potrebn broj mjerenja neke pojave, olakšava se prikaz, tumačenje i usporedba rezultata mjerenja, te omogućuje primjena analogije [14].

U svrhu lakšeg prikaza i usporedbe rezultata numeričkih simulacija definiraju se bezdimenzijski koeficijenti aerodinamičkih sila i momenata. Za njihovo definiranje potrebni su nam dinamički tlak  $1/2\rho v_\infty^2$ , referentna površina  $A$  i referentna duljina  $l$ .

Za slučaj aerodinamike cestovnih vozila, za referentnu površinu  $A$  uzima se čeona površina vozila, dok se za referentnu duljinu  $l$  uzima već spomenuti osovinski razmak prema [15]. Tada bezdimenzijski koeficijenti sila i momenata glase:

- $C_L = \frac{2L}{\rho v_\infty^2 A}$  - bezdimenzijski koeficijent uzgona
- $C_D = \frac{2D}{\rho v_\infty^2 A}$  - bezdimenzijski koeficijent otpora
- $C_M = \frac{2M}{\rho v_\infty^2 A l}$  - bezdimenzijski koeficijent momenta

$$\triangleright \quad C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho v_\infty^2} = 1 - \left( \frac{v}{v_\infty} \right)^2 \text{ - bezdimenzijski koeficijent tlaka}$$

Bernoullijeva jednadžba duž strujnice kaže da suma statičkog i dinamičkog tlaka mora uvijek biti konstantna, tako da vrijedi

$$\underbrace{p_\infty + \frac{1}{2} \rho v_\infty^2}_{\text{statički i dinamički tlak u neporemećenoj struji}} = \underbrace{p + \frac{1}{2} \rho v^2}_{\text{statički i dinamički tlak u promatranoj točki}} . \quad (4.4)$$

Izraz za bezdimenzijski koeficijent tlaka izražen preko brzina strujanja slijedi iz kombinacije izraza za bezdimenzijski koeficijent tlaka zapisan preko tlakova te izraza (4.4), pa uvrštavanjem dobivamo

$$C_p = 1 - \frac{\cancel{\frac{1}{2} \rho} v^2}{\cancel{\frac{1}{2} \rho} v_\infty^2} = 1 - \left( \frac{v}{v_\infty} \right)^2 . \quad (4.5)$$

Kada uvrstimo brzinu strujanja u točki zastoja koja je jednaka nuli dobivamo:

$$C_p = 1 - \left( \frac{0}{v_\infty} \right)^2 = 1 - 0 = 1 . \quad (4.6)$$

Teoretski, ovo je maksimalna vrijednost iznosa bezdimenzijskog koeficijenta tlaka pri nestlačivom strujanju. Na nekoj udaljenosti od tijela, gdje je strujanje fluida neporemećeno te je lokalna brzina strujanja  $v$  ista kao i neporemećena brzina  $v_\infty$  omjer brzina  $v / v_\infty$  biti će jednak jedinici, te će u toj točki  $C_p$  imati vrijednost nula. Na mjestima gdje će lokalna brzina strujanja  $v$  biti veća od neporemećene brzine  $v_\infty$ , vrijednost  $C_p$  postati će negativnom tj.  $C_p < 0$ .

Tabela 5. dan je pregled karakterističnih vrijednosti bezdimenzijskog koeficijenta tlaka  $C_p$  koje on poprima za različite slučajeve brzine strujanja pri aerodinamici vozila.

Tabela 5. Vrijednosti  $C_p$  u ovisnosti o brzini strujanja

$v$	$C_p$
0	1
$v_\infty$	0
$v > v_\infty$	$< 0$
$0 \leq v \leq v_\infty$	$0 \leq C_p \leq 1$

## 5 Računalna dinamika fluida

Navier-Stokesove jednačbe opisuju viskozno strujanje fluida i predstavljaju osnovne fizikalne zavisnosti koje određuju karakteristike aerodinamičkih strujanja. Rješenja ovih jednačbi jesu polja brzine i tlaka na temelju kojih se mogu izračunati integralne veličine kao što su sile i momenti.

Analitički pristup moguć je za jednostavna strujanja u kojima se Navier-Stokesove jednačbe mogu integrirati i pronaći analitičko rješenje. Naravno, ovakav pristup je važeći za vrlo ograničen broj aerodinamičkih problema, ali na njemu se temelji klasična teorija aerodinamike.

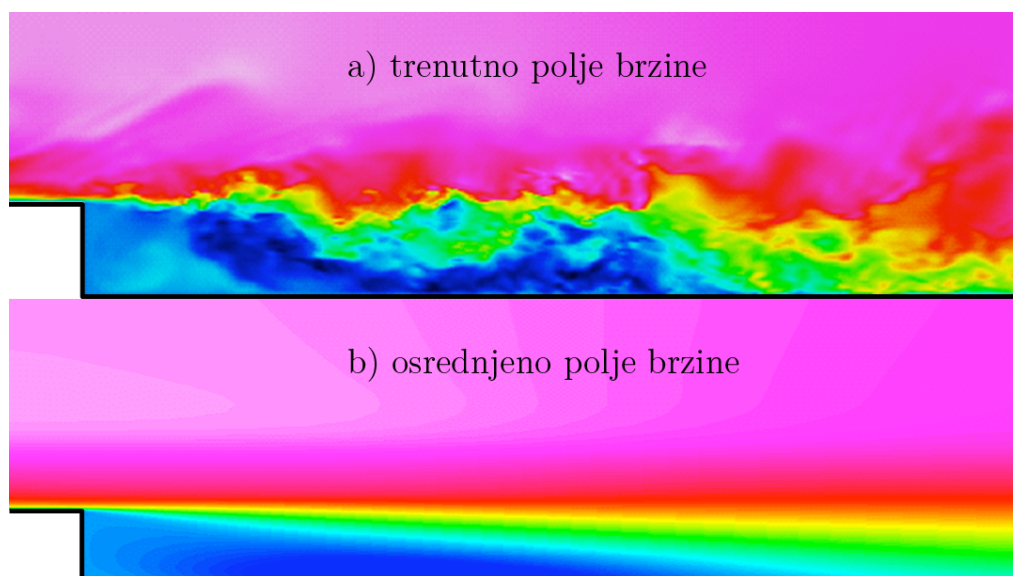
Razvojem računala i povećanjem njihove brzine tijekom posljednje trećine 20. i početkom 21. stoljeća dolazi do revolucije u rješavanju aerodinamičkih problema te se pojavljuje nova disciplina pod nazivom računalna dinamika fluida - RDF (engl. *computational fluid dynamics* - *CFD*). Cilj računalne dinamike fluida jest dobivanje numeričkih vrijednosti varijabli strujanja u diskretnim točkama u vremenu i prostoru [13].

### 5.1 Problemi računalne dinamike fluida

Kao što je spomenuto, strujanje fluida u prirodi najčešće je turbulentno, dok se laminarno strujanje pojavljuje samo pri niskim vrijednostima Reynoldsovog broja. Modeliranje turbulencije jedan je od najvećih problema računalne dinamike fluida zbog toga što je turbulentno strujanje karakterizirano izrazito nestacionarnim poljima brzine strujanja i tlaka koja su odgovorna za transpor veličina poput momenta i energije fluida. Ove nestacionarnosti mogu imati visoke frekvencije, te bi njihovo egzaktno rješavanje bilo prezahtjevno u pogledu raspoloživih računalnih resursa te vremena potrebnog za rješavanje. Ovakav način direktnog rješavanja Navier-Stokes jednačbi bez uporabe modela turbulencije naziva se izravna numerička simulacija (DNS, engl. *direct numerical*

*simulation*) kojom se rješavaju sve veličine turbulentnih vrtloga od najvećih anizotropnih integralnih pulsacija do najmanjih izotropnih Kolmogorovih pulsacija što zahtjeva da diskretizacijska mreža bude dovoljne rezolucije za obuhvaćanje i najmanjih pulsacija, a vremenski korak dovoljno malen da se obuhvate sve frekvencije pulsacija. Jedan korak ispod DNS-a je pristup u kojemu se modeliraju male pulsacije, a direktno se rješavaju samo velike (LES, engl. *large eddy simulation*) koji je za red veličine manje resursno zahtjevan, ali još uvijek prezahjevan za većinu realnih inženjerskih problema.

Umjesto izravnog i poluizravnog rješavanja, moguće je jednačbe koje opisuju strujanje fluida vremenski osrednjiti ili modificirati na neki drugi način u svrhu eliminacije pojava malih razmjera u strujanju, čime dobivamo sustav modificiranih jednačbi koje su vremenski i resursno manje zahtjevne za rješavanje. Nažalost, modificirane jednačbe sadrže dodatne nepoznanice, te se javlja potreba za modelima turbulencije koji omogućuju određivanje ovih nepoznanica uz pomoć poznatih veličina. Jedan od najpopularnijih pristupa jest tzv. Reynoldsovo osrednjavanje Navier-Stokesovih jednačbi (RANS, engl. *Reynolds averaged Navier Stokes*) čiji primjer pokazuje Slika 33.



Slika 33. Trenutno polje brzine i osrednjeno polje brzine

U klasi RANS modela turbulencije postoji više razina kompleksnosti, od onih koji rješavaju jednačbe za sva turbulentna naprezanja (RSM, engl. *Reynolds Stress models*),

do jednostavnih modela temeljenih na Boussinesqovoj hipotezi tj. modeliranju turbulentne viskoznosti.

Turbulentna viskoznost modelira se pomoću dva parametra turbulencije čija raspodjela može biti definirana pomoću diferencijalnih ili algebarskih jednačbi, a najpoznatiji modeli turbulencije sa dvije diferencijalne jednačbe su  $k - \varepsilon$  i  $k - \omega$ , te oba spadaju u klasu linearnih modela turbulentne viskoznosti [16].

## 5.2 RANS jednačbe za viskozno nestlačivo turbulentno strujanje

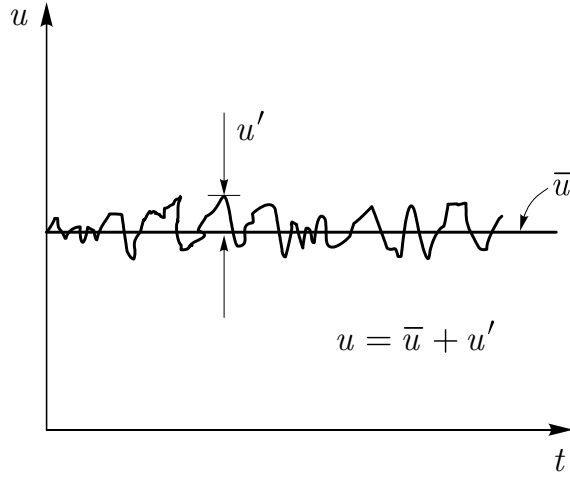
Viskozno nestlačivo turbulentno strujanje (uz zanemarenje masenih sila poput gravitacije) opisano je jednačbama kontinuiteta (5.1) i količine gibanja (5.2) u kojima su nepoznanice polje brzine  $u_i$  i polje tlaka  $p$ , ove jednačbe nazivaju se Navier-Stokesovim jednačbama.

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (5.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \underbrace{\mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)}_{\tau_{ij}} \right) \quad (5.2)$$

Veličine brzine i tlaka prikazuju se zbrojem osrednjene vrijednosti i pulsirajućeg dijela uz pomoć izraza (5.3), dok grafički prikaz relacije prikazuje Slika 34.

$$\begin{aligned} u_i &= \bar{u}_i + u'_i \\ p &= \bar{p} + p' \end{aligned} \quad (5.3)$$



Slika 34. Veza između osrednjene i pulsirajuće komponente brzine

Vremenskim osrednjavanjem izraza (5.1) i (5.2) dobivaju se jednačbe kontinuiteta i količine gibanja za osrednjeno strujanje koje prema [17] glase

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (5.4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho u'_i u'_j} \right]. \quad (5.5)$$

Očito je da je oblik Navier-Stokesovih jednačbi za direktno rješavanje dan izrazima (5.1) i (5.2) vrlo sličan osrednjenom obliku Navier-Stokesovih jednačbi (RANS) danom izrazima (5.4) i (5.5). Zapravo, jedina razlika je predstavnik pulsirajućeg strujanja  $-\overline{\rho u'_i u'_j}$ . Taj član označava turbulentnu difuziju količine gibanja koja odgovara viskoznim naprezanjima te ga nazivamo turbulentnim ili Reynoldsovim naprezanjem.

Tenzor Reynoldsovih naprezanja je simetričan tenzor sa šest nepoznanica

$$\tau_{ij} = -\rho \begin{bmatrix} \overline{u'^2} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{u'v'} & \overline{v'^2} & \overline{v'w'} \\ \overline{u'w'} & \overline{v'w'} & \overline{w'^2} \end{bmatrix}, \quad (5.6)$$



te primjećujemo da RANS jednačbe sadrže više nepoznanica nego što ima jednačbi pa takav sustav nema jedinstveno rješenje. Da bi riješili RANS jednačbe potrebno je sustav zatvoriti modelima turbulencije čiji je zadatak usklađivanje broja jednačbi i broja nepoznatih polja pri čemu se zaustavljaju na određenoj korelaciji, dok se sve više korelacije modeliraju pomoću nižih tj. onih obuhvaćenih modelom turbulencije.

Opći zahtjevi koji se postavljaju pred model turbulencije su: univerzalnost, točnost, ekonomičnost i jednostavnost. Činjenica je da ne postoji jedinstven model turbulencije koji bi bio univerzalno prihvaćen kao superioran za sve vrste problema strujanja. Time izbor modela turbulencije postaje zavisao o fizikalnim svojstvima strujanja koje se razmatra, trenutnim normama i konvencijama pri rješavanju problema te vrste, potrebnoj razini točnosti, raspoloživim računalnim resursima i vremenu za rješavanje.

### 5.3 Modeli turbulencije

Problem zatvaranja sustava RANS jednačbi može se riješiti na dva načina:

➤ Reynolds Stress modelima – koji imaju prednosti u kompleksnim 3D strujanjima s vrtloženjem, ali su kompleksniji i teže konvergiraju, a u kojima se tenzor Reynoldsovih naprezanja rješava pomoću transportnih jednačbi,

➤ Modelima turbulentne viskoznosti – tenzor Reynoldsovih naprezanja modelira se pomoću koeficijenta turbulentne viskoznosti  $\mu_t$  uz korištenje Boussinesqove hipoteze koja za nestlačivo strujanje glasi

$$\tau_{ij} = \mu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \bar{\rho} \bar{k} \delta_{ij} \quad , \quad \text{čime je šest komponenti tenzora}$$

Reynoldsovih naprezanja modelirano jednim nepoznatim poljem koeficijenta turbulentne viskoznosti  $\mu_t$ .

Uvrštavanjem Boussinesqove hipoteze u jednadžbu količine gibanja danu izrazom (5.5) dobivamo jednadžbu količine gibanja (5.7), koja se će biti korištena u odabranom modelu turbulencije ( $k - \varepsilon$ )

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \mu_t) \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right], \quad (5.7)$$

u kojoj je efektivni tlak definiran kao  $\bar{p} = \bar{p} + 2/3 \rho \bar{k}$  nakon uvrštavanja Boussinesqove hipoteze u početnu jednadžbu količine gibanja.

Za sve diferencijalne modele s dvije jednadžbe (poput  $k - \varepsilon$  modela), za karakterističnu brzinu turbulencije koristi se  $v_t = \sqrt{\bar{k}}$ , gdje je  $\bar{k} = \overline{u'_i u'_i} / 2$  kinetička energija turbulencije (engl. *turbulent kinetic energy*), a razlikuju se prema izboru druge veličine. Pošto se koeficijent turbulentne viskoznosti definira u obliku  $\mu_t = \rho l_t v_t$ , druga karakteristična veličina može biti bilo koja veličina uz čiju se dimenziju zajedno s dimenzijom  $v_t$  može dobiti dimenzija karakteristične duljine turbulencije  $l_t$ .

Najpopularniji modeli iz ove skupine su već spomenuti  $k - \varepsilon$  i  $k - \omega$ , pri čemu je  $\bar{\varepsilon}$  vremenski osrednjena vrijednost brzine disipacije kinetičke energije u unutarnju energiju, a  $\bar{\omega}$  vremenski osrednjena kutna brzina rotacije čestica fluida.

Dimenzija  $\bar{k}$  je  $L^2 T^{-2}$ , a jedinica u SI sustavu  $m^2/s^2$ , dok je dimenzija  $\bar{\varepsilon}$   $L^2 T^{-3}$ , a jedinica u SI sustavu  $m^2/s^3$ . Kombinacija koja nam daje dimenziju duljine je  $\bar{k}^{3/2}/\bar{\varepsilon}$  što onda  $l_t$  čini proporcionalnim  $\bar{k}^{3/2}/\bar{\varepsilon}$  tj. dobivamo da je  $l_t \sim \bar{k}^{3/2}/\bar{\varepsilon}$ . Kada ovu jednakost uvrstimo u polaznu definiciju koeficijenta turbulentne viskoznosti dobivamo

$$\mu_t \sim \rho \frac{\bar{k}^2}{\bar{\varepsilon}} \text{ ili } \mu_t = C_\mu \rho \frac{\bar{k}^2}{\bar{\varepsilon}}. \quad (5.8)$$

Da bi mogli pisati znak jednakosti u izrazu (5.8) bilo je nužno uvesti bezdimenzijski koeficijent  $C_\mu$  koji je za visoke vrijednosti Reynoldsova broja (razvijeno turbulentno strujanje) konstanta i iznosi  $C_\mu = 0,09$ .

Ovakvi modeli turbulencije rješavaju se s dvije dodatne diferencijalne jednačbe kojima se definira prostorna raspodjela  $\bar{k}$  i  $\bar{\varepsilon}$  (ili  $\bar{\omega}$ ) a one za  $k - \varepsilon$  model glase

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{k}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_j \bar{k}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \bar{k}}{\partial x_j} \right] + \underbrace{G}_{\text{produkcija}} - \underbrace{\rho \bar{\varepsilon}}_{\text{disipacija}} \quad (5.9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{\varepsilon}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_j \bar{\varepsilon}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial x_j} \right] + \frac{\bar{\varepsilon}}{\bar{k}} (C_1 G - C_2 \rho \bar{\varepsilon}). \quad (5.10)$$

Izraz (5.9) predstavlja konačni oblik modelirane jednačbe za kinetičku energiju turbulencije ( $k$ ), dok izraz (5.10) predstavlja konačni oblik jednačbe za disipaciju kinetičke energije ( $\varepsilon$ ) u *standardnom*  $k - \varepsilon$  modelu.

### 5.3.1 Ostvarivi $k - \varepsilon$ model

Pri simulaciji je korišten *ostvarivi*  $k - \varepsilon$  model turbulencije (engl. *realizable*  $k - \varepsilon$ ) prema preporuci [18]. Ovaj model turbulencije razvijen je u svrhu ispravka poznatih nedostataka tradicionalnih  $k - \varepsilon$  modela. Izrazom *ostvarivi* želi se reći da model zadovoljava određena matematička ograničenja normalnih naprezanja konzistentnih s dinamikom turbulentnih strujanja, npr. kombinacijom Boussinesqove hipoteze i definicije viskoznosti vrtloga može se doći do izraza za normalno Reynoldsovo naprezanje koje unatoč tome što je definirano kao pozitivna veličina, postaje negativno tj. *neostvarivo* kada deformacija (engl. *strain*) prijeđe određeni iznos (3,7). Također, Schwarzova nejednakost za smična naprezanja može biti prekršena kada je promjena srednje deformacije prevelika. Izravan način za osiguranje ostvarivosti (pozitivnost normalnih naprezanja i Schwarzove nejednakosti za smična naprezanja) je uz pomoć nove formulacije turbulentne viskoznosti pri kojoj  $C_\mu$  više nije konstanta nego varijabla koja je senzibilizirana na srednje deformacije i parametre turbulencije ( $k$  i  $\varepsilon$ ). Ideju o varijabilnosti  $C_\mu$  predložili su mnogi istraživači ovog područja uključujući Reynolds, te je ona potkrijepljena mnogim empirijskim dokazima. Drugi manjak tradicionalnih  $k - \varepsilon$

modela leži u modeliranoj transportnoj jednadžbi za disipaciju turbulentne kinetičke energije ( $\varepsilon$ ). Poznata anomalija okruglog mlaza naziv je dobila prema uočenoj pojavi da se širenje ravninskih mlazovima predviđa relativno dobro dok je predviđanje širenja osno simetričnih mlazova iznenađujuće loše. Nova transportna jednadžba za disipaciju turbulentne kinetičke energije temelji se na točnoj transportnoj jednadžbi srednjeg kvadrata oscilacije vrtložnosti i dana je izrazom (5.11).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\bar{\varepsilon}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\bar{u}_j\bar{\varepsilon}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial x_j} \right] + \frac{\bar{\varepsilon}}{\bar{k}} C_1 - C_2 \rho \frac{\bar{\varepsilon}^2}{\bar{k} + \sqrt{\nu\varepsilon}} + C_1 \rho \bar{\varepsilon} \quad (5.11)$$

Važno je napomenuti da ostali  $k - \varepsilon$  modeli u spomenutoj transportnoj jednadžbi imaju singularitet u izrazu za ponor zbog pozicije  $k$  u nazivniku izraza, čime izraz može nestati ako  $k$  poprimi vrijednost manju od nule.

Ostvarivi  $k - \varepsilon$  model daje fizikalno moguća rješenja i provjeren je u praksi na širokom rasponu strujanja uz zaključak da pruža primjetno bolje rezultate od standardnog  $k - \varepsilon$  modela.

## 5.4 Zidne funkcije

Prisustvo čvrstih stijenki odnosno zidova izrazito snažno utječe na turbulentna strujanja. Polje brzine je pod očitim utjecajem prisustva *no-slip* uvjeta koji mora biti ispunjen na čvrstoj stijenci. Međutim, prisustvo čvrstih stijenki utječe na turbulenciju i na druge načine, poput pojave viskoznog prigušenja blizu same stijenke koje smanjuje oscilacije tangencijalne brzine, dok efekt kinematičke opstrukcije smanjuje oscilacije u normalnom smjeru. Kako se pomičemo prema vanjskom dijelu graničnog sloja stijenke, turbulencija se povećava zbog produkcije kinetičke energije turbulencije kao rezultat velikih gradijenata u brzini strujanja [19].

Modeliranje graničnog sloja oko čvrstih stijenki znatno utječe na vjerodostojnost simulacije utoliko što su čvrste stijenke glavni izvor vrtloženja i turbulencije, dapače, u blizini stijenki sve varijable simulacije imaju najveće gradijente te se transport količine

gibanja i ostalih veličina tamo najjače odvija. Očito je, da točan prikaz turbulentnog strujanja u prisustvu čvrstih stijenki itekako ovisi o preciznoj reprezentaciji strujanja u graničnom sloju stijenske.

Brojni eksperimenti pokazali su da se granični sloj čvrste stijenske može podijeliti u dva osnovna sloja – *unutarnji* i *vanjski*. Nadalje, unutarnji sloj dijeli se na tri dijela: viskozni (engl. *viscous sublayer*), prijelazni (engl. *buffer layer*) i inercijski podsloj (engl. *log-law region*). Sloj uz samu stijenu naziva se viskozni podsloj. U tom podsloju je strujanje skoro laminarno i dinamička viskoznost (molekularna) ima ključnu ulogu u transportu količine gibanja i mase, dok je turbulentna viskoznost zanemariva. U inercijskom podsloju je pak zanemariva molekularna viskoznost, dok turbulentna viskoznost igra veću ulogu, a profil brzine slijedi logaritamski zakon, dok je u prijelaznom podsloju podjednak utjecaj molekularne i turbulentne viskoznosti.

Iz navedenog je očito da uz samu stijenu neće vrijediti odabrani  $k - \varepsilon$  model turbulencije zbog male vrijednosti turbulentne viskoznosti, te je potrebno definirati unutarnje rubne uvjete pomoću kojih je moguće premostiti područje između stijenske i vanjskog dijela graničnog sloja gdje izabrani model turbulencije opet počinje biti vrijediti.

Postoje dva načina premošćivanja ovog problematičnog područja:

- posebnim modelom turbulencije koji će vrijediti u području graničnog sloja,
- polu-empirijskim (iskustvenim) zidnim funkcijama (engl. *wall functions*).

Posebni modeli turbulencije koji vrijede unutar graničnog sloja zahtijevaju mrežu (engl. *mesh*) visoke rezolucije u smjeru normale na čvrstu stijenu, te se u njima jednadžbe integriraju skroz do viskoznog podsloja. Iako je ova metoda točnija, i samim pristupom je pogodnija za rješavanje kompleksnih turbulentnih strujanja s izrazitim odvajanjima, ponovnim lijepljenjem te nepovoljnim gradijentima tlaka, izrazito je resursno i vremenski

zahtjevana. Čak u dvodimenzionalnim simulacijama, rješavanje graničnog sloja pomoću modela turbulencije može utrostručiti broj konačnih volumena u računalnoj mreži.

Zidne funkcije temelje se na brojnim eksperimentima i daju kvalitetne rezultate što se tiče smičnih naprezanja i raspodjele tlaka, a pri tom ne zahtijevaju odveć gustu i kvalitetnu mrežu uz samu stijenku zida, te su mnogo prihvatljivije sa stajališta resursa i vremena rješavanja.

Neposredno u blizini stijenke strujanje je paralelno sa stijenkom, a komponenta brzine okomita na stijenku je zanemariva. Ako komponentu brzine strujanja paralelnu sa stijenkom označimo sa  $\bar{u}$ , a koordinatu normale na stijenku sa  $y$ , onda zanemarivanjem članova manjeg reda veličine u jednadžbi količine gibanja slijedi

$$\frac{\partial}{\partial y} \left[ (\mu + \mu_t) \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right] = \frac{\partial \tau}{\partial y} = 0 \quad (5.12)$$

iz čega zaključujemo da je tangencijalno naprezanje u smjeru okomito na stijenku konstantno i jednako naprezanju na stijenci  $\tau = \tau_w = \text{konst.}$  Već smo zaključili da u blizini stijenke postoji viskozno prigušenje turbulentnih pulsacija čija je posljedica mala turbulentna viskoznost (može se zanemariti) pa se iz izraza (5.12) može izvesti da je profil brzine linearan

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial y} \left[ (\mu + \mu_t) \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right] &= \frac{\partial \tau_w}{\partial y} \quad / \quad \int \\ \mu \frac{\bar{u}}{y} &= \tau_w \quad / \quad \cdot y \quad / \quad : \mu \quad , \quad (5.13) \\ \bar{u} &= \frac{\tau_w}{\mu} y \text{ - linearan profil brzine} \end{aligned}$$

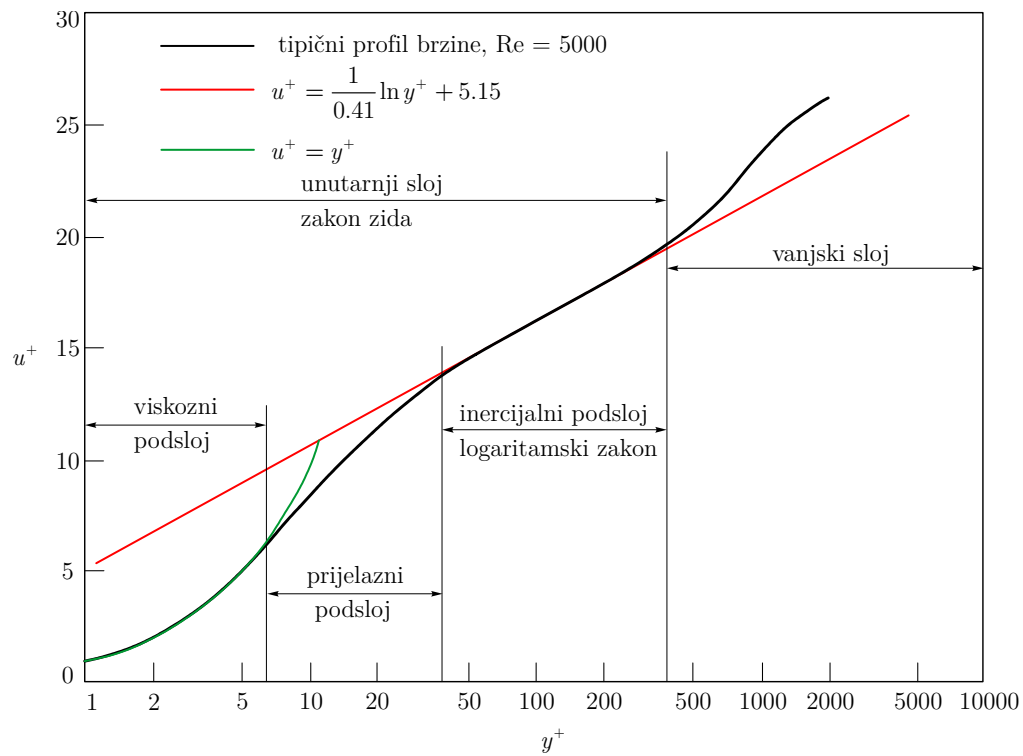
$\bar{u}$	(m/s)	komponenta brzine paralelna sa stijenkom
$\tau_w$	(Pa)	smično naprezanje
$\mu$	(Pa · s)	dinamička (molekularna) viskoznost
$y$	(m)	normalna udaljenost od zida

što zapisano bezdimenzijski glasi  $y^+ = y^+$ , gdje je  $u^+ = \bar{u}/u_\tau$ , a veličina  $u_\tau$  naziva se brzinom trenja i iznosi  $u_\tau = \sqrt{\tau_w/\rho}$ . Cilj je izvesti bezdimenzijsku udaljenost od zida  $y^+$  koju koristimo za određivanje valjanosti zidnih funkcija koje su važeće u području  $30 \leq y^+ \leq 300$  (500). Do izraza za  $y^+$  doći ćemo na sljedeći način:

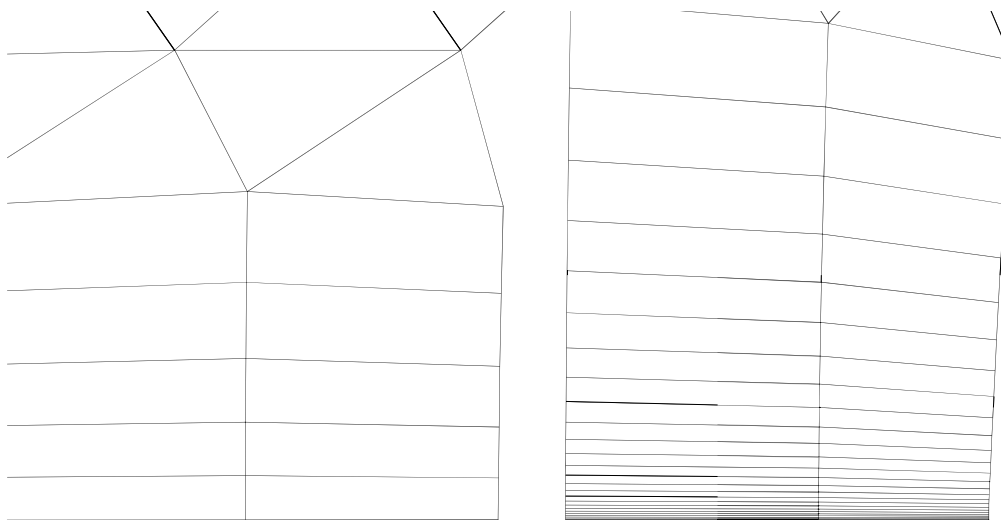
$$\begin{aligned}
 y^+ &= u^+ \\
 y^+ &= \frac{\bar{u}}{u_\tau} = \frac{\frac{\tau_w}{\mu} y}{u_\tau}, \text{ uz } u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \rightarrow \tau_w = \rho u_\tau^2 \\
 y^+ &= \frac{\rho u_\tau y}{\mu} = \frac{\rho u_\tau}{\mu} y, \text{ uz } \nu = \frac{\mu}{\rho} \text{ slijedi} \\
 &\boxed{y^+ = \frac{u_\tau}{\nu} y}
 \end{aligned} \tag{5.14}$$

što govori da je  $y^+$  ovisan o brzini trenja uz stijenu zida, kinematskoj viskoznosti fluida i normalnoj udaljenosti od zida. Pošto će strujanje na određenim mjestima oko automobila uvijek biti slično, može se generalizirati i reći da  $y^+$  proporcionalno ovisi o  $y$ , tj. ako se želi smanjiti ili povećati bezdimenzijska udaljenost težišta prvog konačnog volumena uz stijenu zida, parametar koji se treba promijeniti jest visina prvog elementa.

Strukturu graničnog sloja pri turbulentnom strujanju preko ravne horizontalne ploče prikazuje Slika 35., dok Slika 36. prikazuje usporedbu potrebne razlučivosti mreže u području graničnog sloja uz čvrstu stijenu pri primjeni zidnih funkcija (lijevo) i pri primjeni posebnog modela turbulencije (desno).



Slika 35. Turbulentni granični sloj kod nastrujavanja na ravnu ploču



Slika 36. Diskretizacijske mreže uz čvrstu stijenku pri primjeni zidnih funkcija (lijevo) i pri primjeni posebnog modela turbulencije (desno)



## 5.5 Metoda konačnih volumena

Nakon odabira primjerenog matematičkog modela za prikaz strujanja, treba odabrati numeričku metodu rješavanja istog. Klasično, postoje tri vrste numeričkih metoda za diskretizaciju parcijalnih diferencijalnih jednadžbi:

- metoda konačnih razlika,
- metoda konačnih elemenata,
- metoda konačnih volumena.

Pri korištenju bilo koje od navedenih metoda, prvi korak je uvijek diskretizacija kontinuirane domene promatranog problema.

Najstarija je metoda konačnih razlika koja se temelji na lokalnom razvoju u Taylorov red da bi se derivacije aproksimirale konačnim razlikama, što rezultira sustavom algebarskih jednadžbi. Metoda koristi topološku kvadratnu mrežu linija za diskretizaciju parcijalnih diferencijalnih jednadžbi, što ograničava njezinu primjenu kod kompleksnih geometrija u dvije i tri dimenzije. Ovaj problem potaknuo je razvoj i primjenu metoda konačnih elemenata i konačnih volumena.

U metodi konačnih elemenata veličine u svakom elementu aproksimiraju se interpolacijskim funkcijama, koje duž ruba elementa moraju zadovoljavati određene rubne uvjete da bi diskretizirani model bio što bliži kontinuiranom sustavu. Pri izvođenju algebarskih jednadžbi polazi se od diferencijalnih jednadžbi (metoda težinskog reziduala) ili se koristi varijacijska formulacija. Pretpostavlja se približno rješenje u čvorovima te se ono uvrštava u diferencijalnu jednadžbu pri čemu se pojavljuje rezidual. Galerkinovim postupkom se minimizira rezidual te se dobiva sustav algebarskih jednadžbi u kojemu su nepoznanice parametri u čvorovima.

Pri razvoju metode konačnih volumena, transportne jednadžbe primijenjene su na dio prostora koji nazivamo konačnim volumenom. Dok metoda konačnih razlika koristi matematičke operatore za aproksimaciju derivacija, a metoda konačnih elemenata

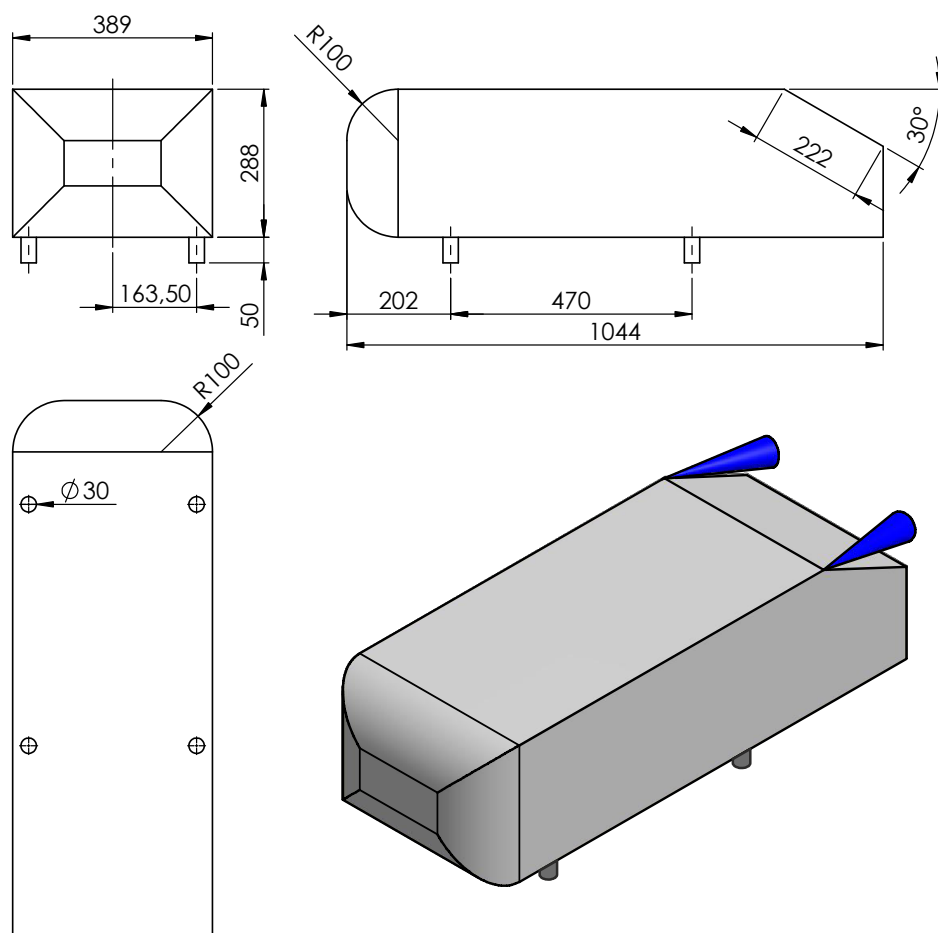
interpolacijske funkcije, metoda konačnih volumena koristi konzervativni oblik transportnih jednažbi primjeren za integraciju po dijelu prostora tj. konačnom volumenu.

Pošto u metodi konačnih volumena protoci kroz kontrolne površine susjednih konačnih volumena zadovoljavaju zakone očuvanja, ova metoda primjerena je za kompleksne geometrije koje se obuhvaćaju nestrukturiranim tetraedarskim mrežama (engl. *unstructured tetrahedral mesh*), a daje fizikalna rješenja i za grublje diskretizacijske mreže. Ove karakteristike čine metodu konačnih volumena najčešće primijenjenom u području računalne dinamike fluida te se ona koristi u većini programskih paketa za rješavanje problema strujanja, uključujući ANSYS FLUENT korišten u ovome radu.

## 6 Validacija postavki numeričke simulacije

Prije simulacije strujanja oko izabranog modela vozila provedena je validacija pristupa izradi mreže i numeričkom rješavanju za Ahmedovo referentno tijelo [20]. Ahmedovo tijelo referentni je model tupog tijela (engl. *bluff, blunt body*) koje se koristi za validaciju načina rješavanja problema računalne dinamike fluida za primjenu u autoindustriji, a temelji se na eksperimentalnom istraživanju provedenom 1984. na *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.* (DLR). Ahmedovo tijelo primjereno je kao model za aerodinamiku vozila pošto kod njega skoro 85% aerodinamičkog otpora otpada na otpor oblika (engl. *form drag, pressure drag*) dok varijabilni nagib stražnje površine omogućava postizanje određenih struktura strujanja tipičnih za aerodinamički trag vozila (engl. *wake*) poput protusmjerno rotirajućih vrtloga [11].

Dimenzije Ahmedovog tijela prikazuje Slika 37., na kojoj su ucrtana i dva protusmjerno rotirajuća vrtloga tipična za nagib stražnje površine od  $30^\circ$ , što odgovara obliku stražnjeg kraja izabranog modela automobila (engl. *fastback*).



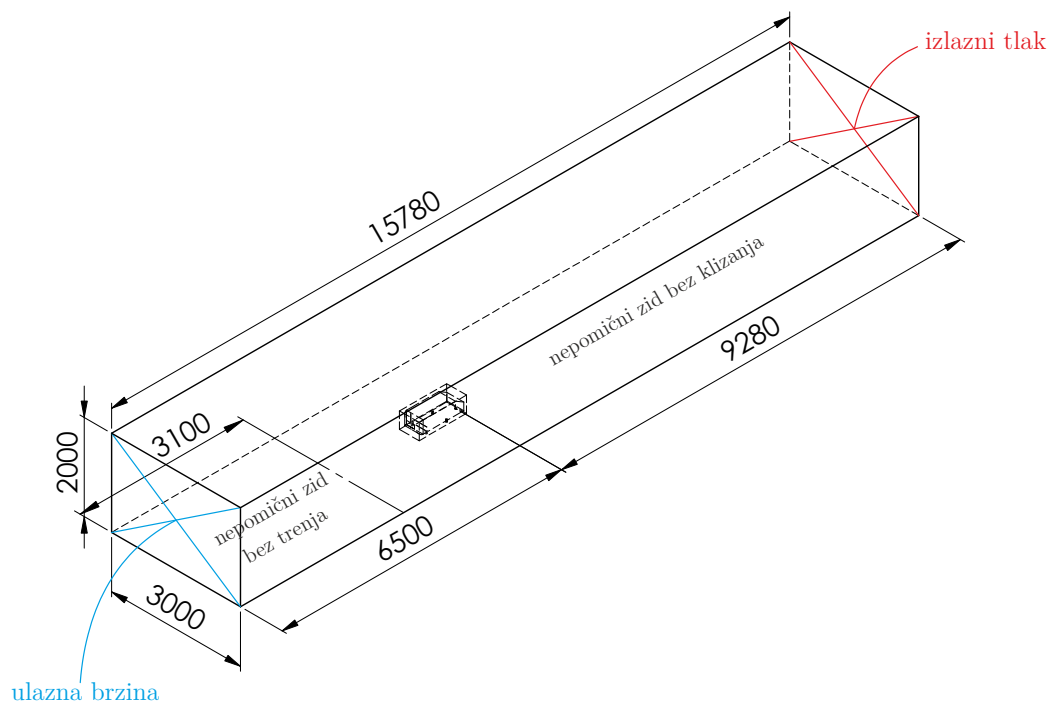
Slika 37. Ahmedovo referentno tijelo

Iako je S. R. Ahmed prvi radio eksperimente na ovome tijelu, validacija pristupa učinjena je prema rezultatima eksperimentalne studije [9] iz 2004. godine izvršene u RMIT University industrijskom zračnom tunelu koji se nalazi u Melbourneu, u Australiji. Tunel je zatvorenog tipa sa nepomičnim tlom, dimenzija 3 m x 2 m x 9 m, te je u njemu moguće simulirati brzine strujanja do 43 m/s uz longitudinalni intenzitet turbulencija od 1,5 %. Brzina strujanja pri eksperimentu sa dva Ahmedova tijela na različitim međusobnim razmacima u rasponu  $0.125 < x / L < 4$  bila je 35 m/s čime je dobiven Reynoldsov broj temeljen na duljini modela od  $2,3 \cdot 10^6$ .

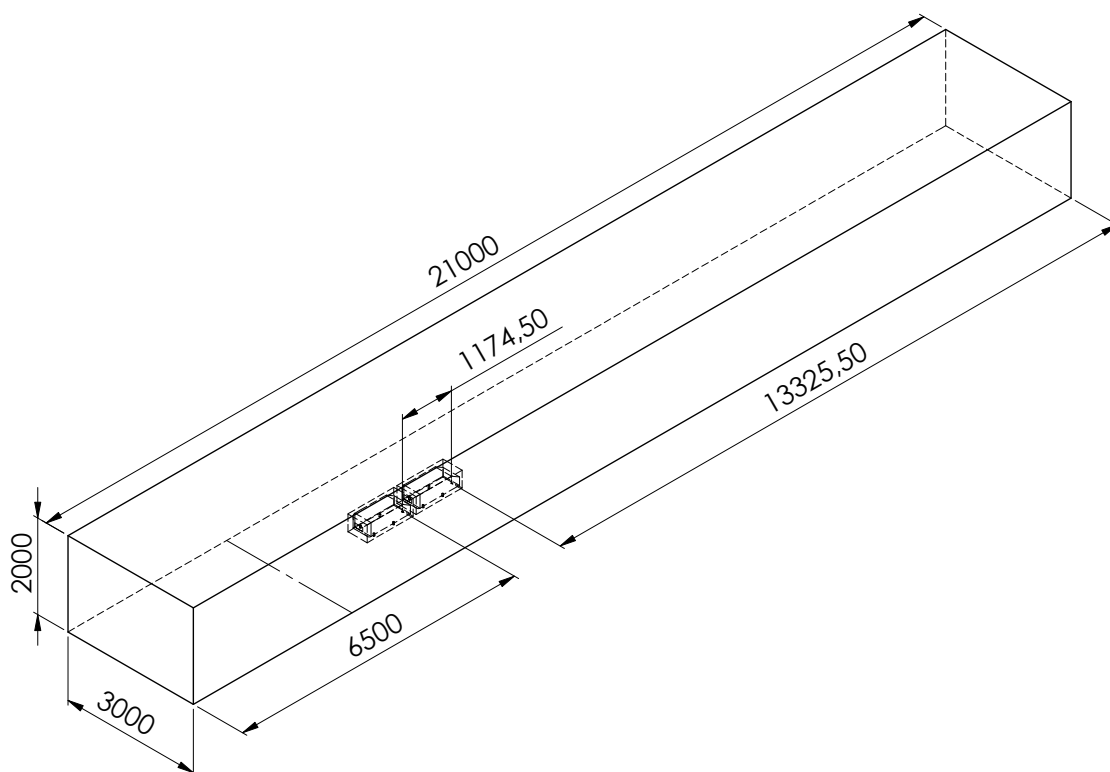
Intenzitet turbulencije neporemećenog strujanja bio je 1,8 % dok je faktor smanjenja poprečnog presjeka zračnog tunela<sup>6</sup> (engl. *blockage ratio*) iznosio  $< 2\%$  pa nije vršena korekcija rezultata vezana uz smanjenje presjeka. Duljina domene za numeričku analizu povećana je u odnosi na duljinu zračnog tunela tako da udaljenost od stražnjeg kraja pratećeg Ahmedovog tijela do izlaznog presjeka domene za slučaj  $x/L = 4$  iznosi više od  $9L$  gdje je  $L$  duljina Ahmedovog tijela. To je napravljeno u svrhu izbjegavanja utjecaja izlaznog presjeka domene na strujanje oko tijela. Tako određena ukupna duljina domene od 21 m nije smanjivana za slučajeve manjeg međusobnog razmaka tijela pa je za slučaj najmanje udaljenosti  $x/L = 0.125$  udaljenost od stražnjeg kraja pratećeg Ahmedovog tijela do izlaznog presjeka domene iznosila  $\sim 13L$ . Udaljenost ulaznog presjeka u domenu od prednjeg kraja vodećeg Ahmedovog tijela za sve slučajeve je identična i iznosi  $\sim 5L$ . Ishodište koordinatnog sustava nalazi se u presjecištu vertikalne ravnine simetrije vodećeg Ahmedovog tijela, vertikalne ravnine u kojoj se nalazi njegova stražnja površina i horizontalne ravnine poda (donjeg ruba domene), prema originalnom eksperimentu iz 1984. godine. Prema rezultatima mjerenja ERCOFTAC-a iz 2001. godine za testni slučaj 9.4 [21] visina graničnog sloja u praznom tunelu na 1,444 m udaljenosti od ishodišta koordinatnog sustava modela bila je  $\delta = 30\text{ mm}$ . Zbog ovog podatka, početnom dijelu poda duljine 3,1 m od ulaza u domenu dodijeljen je rubni uvjet zida bez trenja (engl. *slip condition*) kako bi sljedećih 3,1 m poda s rubnim uvjetom lijepljenja osiguralo približno jednaku visinu graničnog sloja kao i u eksperimentu.

---

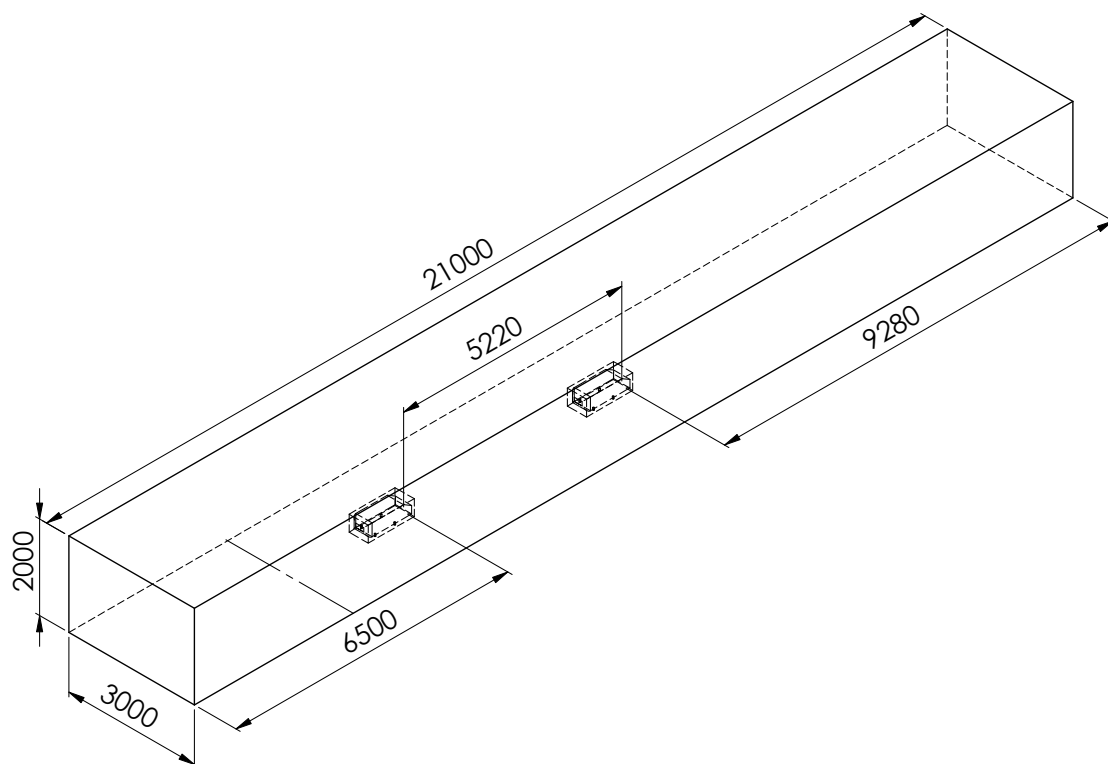
<sup>6</sup> Smanjenje poprečnog presjeka zračnog tunela nastaje kada se u njega postavi tijelo na kojemu se vrši eksperiment čime se smanjuje efektivni poprečni presjek tunela. Izraz za faktor smanjenja poprečnog presjeka glasi  $\beta = \left( A / A_{\text{tunela}} \right) \cdot 100, \%$  gdje je  $A$  čelna površina ispitivanog tijela.



Slika 38. Dimenzije zračnog tunela u mm i neki rubni uvjeti za simulaciju samostalnog modela  
Sljedeće slike prikazuju dimenzije domena za slučajeve najmanjeg i najvećeg međusobnog razmaka Ahmedovih tijela od  $x/L = 0.125$  i  $x/L = 4$ .

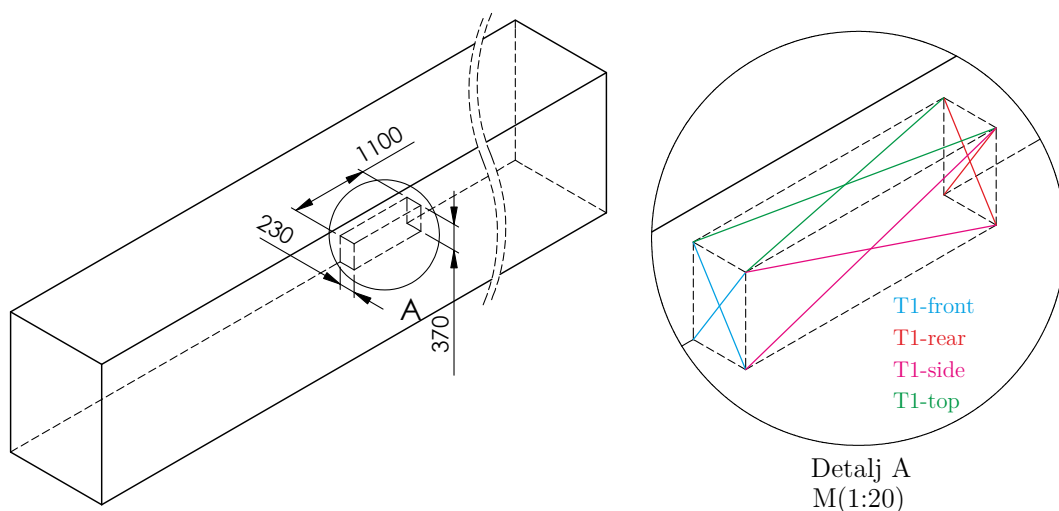


Slika 39. Dimenzije računalne domene u mm za slučaj  $x/L = 0.125$



Slika 40. Dimenzije računalne domene u mm za slučaj  $x / L = 4$

Metoda izrade diskretizacijske mreže opisana u nastavku teksta odabrana je jer omogućuje maksimalne uštede na broju konačnih volumena uz zadovoljavajuće rješenje područja interesa poput aerodinamičkog traga vozila te njegovih interakcija sa tlom. Prvi korak bila je podjela domene u dva zasebna dijela nazvana tunel i vozilo. Dio domene nazvan tunel se dobije izrezivanjem iz ukupne domene manjeg volumena, nazvanog vozilo, u obliku kvadra na mjestu na kojem će se nalaziti vozilo. Slika 41. prikazuje dio ukupne domene nazvan tunel za izolirano vozilo sa spomenutom modifikacijom.



Slika 41. Dio ukupne domene nazvan tunel za izolirano vozilo

Na detalju A vidljivi su nazivi površina koje omeđuju izrezani volumen: T1-front, T1-rear, T1-side te T1-top. Ovim površinama kasnije će biti dodijeljen rubni uvjet sučelja (engl. *interface*) kroz koje će fluid moći strujati unatoč nekonformalnoj mreži koja će se nalaziti u tom području. Volumen koji će se diskretizirati u sklopu dijela domene nazvanog vozilo dijelit će iste ove površine sa dijelom nazvanim tunel te će njihovi nazivi biti C1-front, C1-rear, C1-side te C1-top. U FLUENTu će potom biti kreirana nekomformalna sučelja na način da se uparuju površine istih naziva (front sa front, rear sa rear itd.)

Primarni razlog korištenja spomenutog pristupa jest taj što je moguće izraditi potpuno heksaedarsku mrežu dijela domene zvanog tunel gdje su svi elementi paralelni sa smjerom strujanja te izrazito kvalitetni što smanjuje potreban broj elemenata, dok rezultati ostaju izvanredno kvalitetni zbog manje numeričke difuzije ovih elemenata. Kao što će se vidjeti u rezultatima, polja brzine, tlaka te ostalih veličina od interesa, čak i vrlo daleko iza vozila neće pokazivati difuznost te će granice gradijenata veličina biti oštre i vidljive. Drugi razlog jest taj što zasebna diskretizacija dijela domene oko vozila omogućuje korištenje automatiziranih alata za izradu nestrukturiranih mreža koji vrlo jednostavno obuhvaćaju komplicirane geometrije. Elementi koje takvi alati izrađuju (tetraedri) nisu pogodni za popunjavanje velikih dijelova volumena pravilnog oblika jer je



njihova kvaliteta relativno mala u usporedbi sa strukturiranim elementima (heksaedrima), te broj potrebnih elemenata za kvalitetno obuhvaćanje struktura strujanja raste vrlo brzo. Iz spomenutih razloga je veličina domene oko samog vozila ograničena na apsolutni minimum (npr. 28 mm straga) da bi se što prije dogodio prijelaz na kvalitetne strukturirane elemente. Metoda odabira minimalne duljine domene vozila biti će objašnjena u poglavlju 6.3.

## 6.1 Diskretizacija čvrstih stijenki mreže za Ahmedovo tijelo

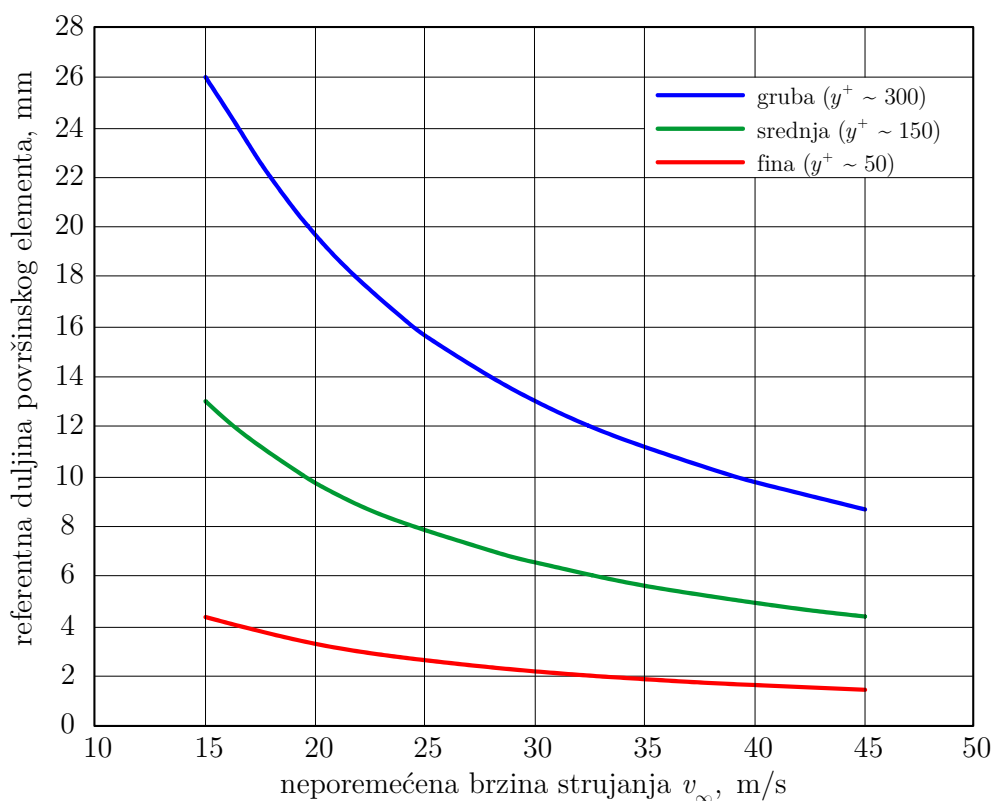
Za tupo tijelo približnog automobilskeg oblika, dominantan je otpor oblika (engl. *pressure* ili *form drag*) nad otporom trenja (engl. *skin friction*). Samim time točnost dobivenih sila otpora i uzgona uvelike ovisi o točnosti raspodjele statičkog tlaka po tijelu. Raspodjela statičkog tlaka pod velikim je utjecajem lokalnog odvajanja i ponovnog lijepljenja strujanja, te je važno da površinska mreža (engl. *surface mesh*) obuhvaća sve relevantne detalje geometrije i zadovoljava preduvjete fizikalnih modela korištenih u simulaciji.

Za strujanja s visokim Reynoldsovim brojem kao što su strujanja oko vozila, poznato je da rješavanje graničnog sloja uz stijenku uz pomoć gušće mreže i posebnih modela turbulencije skroz do viskoznog podsloja nije praktično zbog toga što broj elemenata mreže postaje prevelik. Da bi se prevladali problemi tradicionalnih zidnih funkcija, FLUENT nudi mogućnost korištenja takozvanih neravnotežnih zidnih funkcija - NZF (engl. *non-equilibrium wall functions*) koje su korištene u ovom radu. NZF su osjetljive na efekte gradijenata tlaka što je velika prednost u rješavanju problema aerodinamike cestovnih vozila. Uz to što su osjetljive na gradijente tlaka, NZF uzimaju u obzir efekte lokalne varijacije u debljini viskoznog podsloja pri računanju kinetičke energije turbulencije u elementima blizu zida.

## 6.2 Izrada površinske mreže Ahmedovog tijela

Prvi korak u standardnom pristupu izradi mreže jest izabrati karakterističnu veličinu elemenata površinske mreže na temelju željene raspodjele bezdimenzijske udaljenosti  $y^+$  težišta prvog elementa od zida. Ova karakteristična veličina potom će biti zadana za sve površine tijela te se dobiva inicijalna površinska mreža.

ANSYS nudi grafičku metodu odabira inicijalne karakteristične veličine elemenata površinske mreže na temelju ciljane brzine neporemećenog strujanja [18]. Metodu prikazuje Slika 42.



Slika 42. Metoda procjene karakteristične veličine elemenata površinske mreže za ciljani  $y^+$

Odabir potrebnog stupnja razlučivosti mreže za simulaciju ovisi prije svega o dostupnim resursima za rješavanje. Odabir grube mreže rezultira konačnim brojem elemenata od 2 – 5 milijuna, srednja kvaliteta mreže s otprilike 5 – 10 milijuna, dok fine mreže mogu završiti i s daleko iznad 10 milijuna elemenata [18]. Ukupan broj konačnih elemenata ovisi o kompleksnosti geometrije i izboru metoda za izradu prostorne mreže.

Iako ova metoda pomaže pri izboru početnih postavki mreže, čest je slučaj da se nakon rješavanja prve mreže u rješavaču (engl. *solver*) te analize  $y^+$  raspodjele treba vratiti u aplikaciju za izradu mreže, promijeniti postavke te izraditi mrežu ponovno.

Kao što je već rečeno, pri izradi površinske mreže kreće se od primjene odabrane veličine elementa iz Slika 42. na bridove vozila i plohe za koje je točnost rezultata od velike važnosti. Ovisno o alatu korištenom pri izradi mreže, ovaj korak može uključivati pojednostavljenja geometrija u područjima za koja se smatra da nisu od velike važnosti za vjerodostojnost strujanja, ili progušćenje tj. smanjivanje veličine elemenata da bi obuhvatili geometrijske detalje. Za neporemećenu brzinu strujanja u eksperimentu koja je iznosila 35 m/s te srednju kvalitetu mreže koja se želi postići Slika 42. predlaže veličinu elemenata od 6 mm. S obzirom da je za izradu površinske mreže korišten ANSYS ICEM CFD softverski paket koji u sebi sadrži *top-down*<sup>7</sup> *octree*<sup>8</sup> *mesher* tj. alat za izradu nestrukturiranih tetraedarskih mreža, odabrana je veličina površinskih elemenata 8 mm. *Octree mesher* s metodom odozgora prema dolje radi na način da se u prostoru računalne domene zada maksimalna veličina konačnog volumena koja je poželjna u prostoru s ograničenjem da ista mora biti potencija broja 2, npr. računalna domena za Ahmedovo tijelo dimenzija je 3 m x 2 m x 15 m te ako želimo definirati maksimalni element duljine ~1 m to znači da definiramo 1024 mm ( $2^{10}$ ). Mesher tada cijelu domenu pokušava napuniti elementima veličine 1024 mm, ali dolazi do Ahmedovog tijela koje mu se nalazi na putu i za koje je definirana maksimalna veličina površinskih elemenata od 8 mm. U tom trenutku mesher prepolovi element na tom mjestu te on sada iznosi 512 mm što još uvijek ne zadovoljava prethodno zadanu veličinu površinskih elemenata. Ovakav postupak ponavlja se  $n$  puta dok god prepolovljeni element ne zadovolji definirani maksimum. Iz ovog razloga u octree mesheru nije moguće postići

---

<sup>7</sup> Metoda odozgora prema dolje (engl. *top-down*) kreće od najvećeg mogućeg elementa koji se definira za računalnu domenu te prepolovi početnu dimenziju u svakom sljedećem koraku.

<sup>8</sup> Oktalno stablo (engl. *octree*) je struktura podataka u kojoj svaki čvor ima osmero podčvorova tj. djece. Pogodan je za diskretizacije 3D prostora tj. volumena rekursivnom podjelom u oktante.

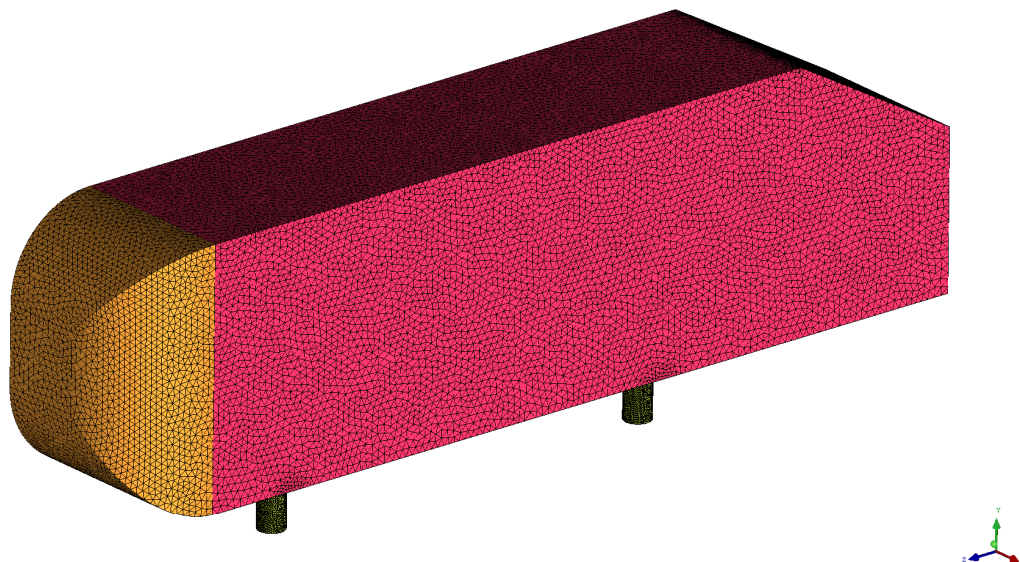
element proizvoljne duljine (kao npr. 6 mm) nego samo razine progušćenja koje su potencije broja 2 (sljedeći korak progušćenja bio bi površinski element od 4 mm, dok bi korak prorjeđenja mreže rezultirao elementima veličine 16 mm). Ovakva mreža ima vrlo nagli rast elemenata (100%) ali se daljnjim postupcima mreža dovodi u stanje geometrijskog rasta elemenata koji se želi postići.

Sam postupak izrade površinske mreže sastojao se iz nekoliko koraka:

- zadavanje ciljane veličine elemenata po površinama vozila i zračnog tunela te funkcije rasta, progušćenja prema zakrivljenosti i blizini stijenki,
- izrada početne *octree* nestrukturirane prostorne tetraedarske mreže,
- uklanjanje prostornih tetraedarskih elemenata što rezultira trokutnom površinskom mrežom,
- glačanje (engl. *smoothing*) preostalih površinskih trokutnih elemenata mreže Laplace metodom do željene kvalitete i stupnja rasta,
- ručni popravak preostalih elemenata niske kvalitete,
- zapis površinske mreže za daljnju izradu prostorne mreže u ANSYS FLUENT Meshing-u (prethodno TGrid).

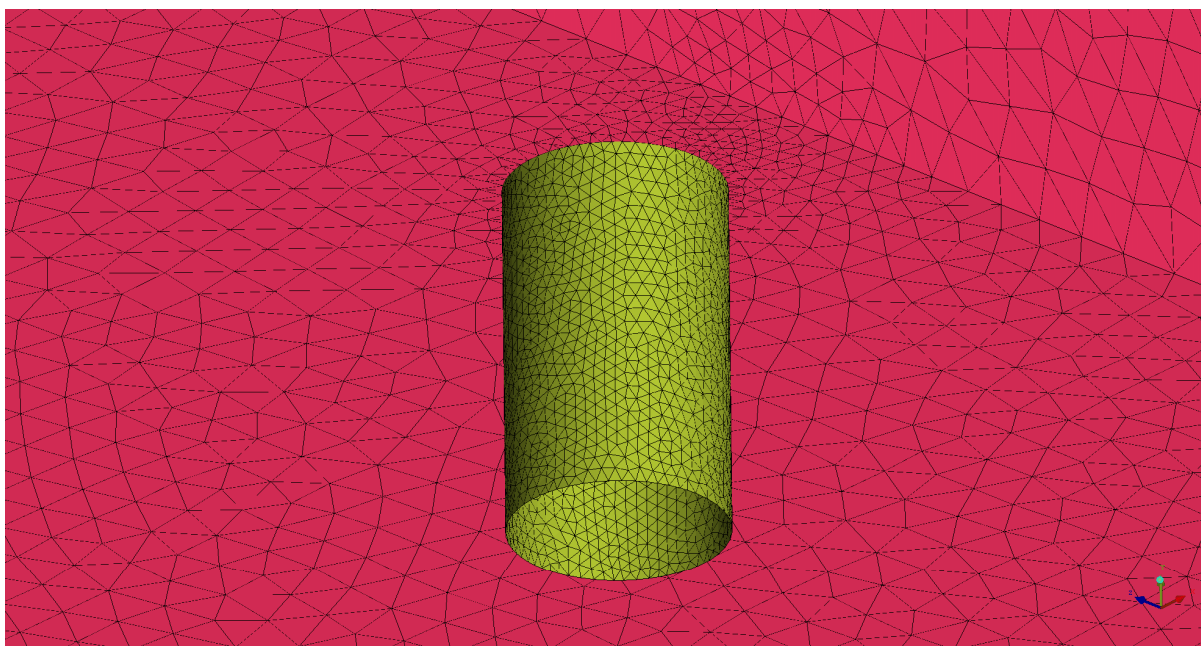
Da bi se izbjegla problematična područja poput uskih razmaka, oštih kutova i sličnog, potrebno je kontrolirati kvalitetu mreže tijekom izrade. Programski paketi za izradu mreža u ANSYS obitelji koriste tzv. iskrivljenost elemenata mreže (engl. *skewness*) kao kriterij kvalitete. Kvalitetnom površinskom mrežom može se smatrati ona koja ima iskrivljenost manju od 0,65 (gdje je 1 maksimalna iskrivljenost, dok je 0 element idealnog oblika). Faktor rasta površinske mreže od elemenata najmanje veličine prema većima ne bi trebao prelaziti 1,2 tj. 20%, što se postiže dostupnim funkcijama povećanja (engl. *sizing functions*) koje dopuštaju zadavanje određenog faktora rasta, automatskog progušćivanja mreže u područjima velike zakrivljenosti ili između bliskih stijenki (engl. *curvature and proximity functions*).

Konačna površinska mreža treba se sastojati od elemenata visoke kvalitete koji dobro opisuju sve zakrivljenosti i geometrijske detalje, dok se relativno ravne površine mogu sastojati od primjereno većih elemenata.

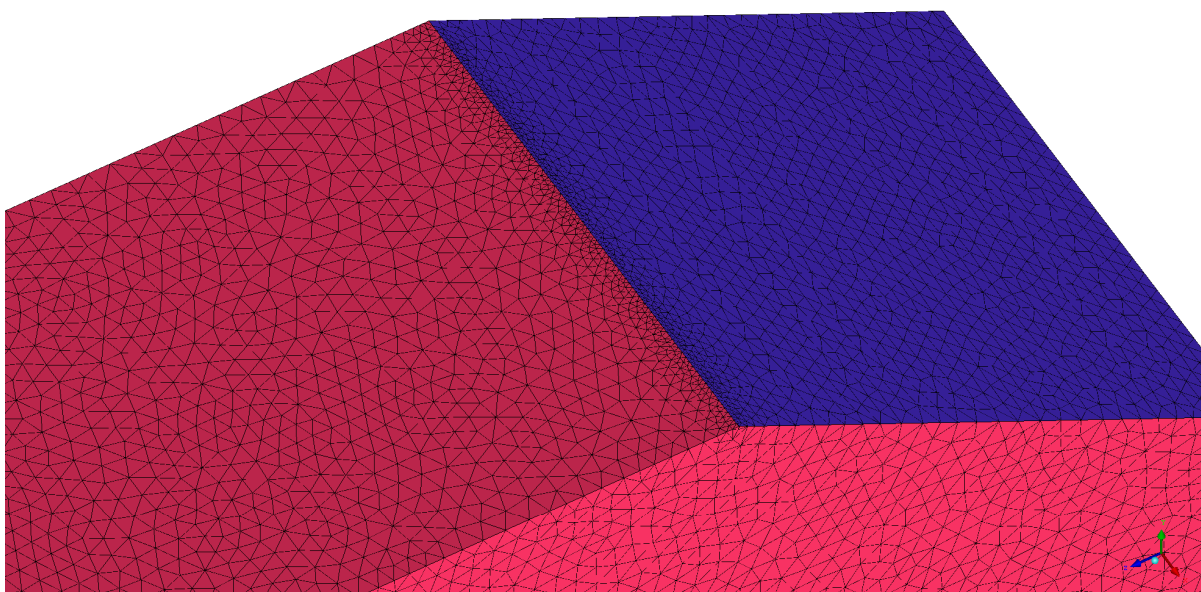


Slika 43. Površinska mreža Ahmedovog tijela izrađena od elemenata prosječne veličine 8 mm

Na nogama Ahmedovog tijela zadana je maksimalna veličina elemenata 2 mm u svrhu točnije aproksimacije valjka promjera 30 mm, vidljiv je rast površinske mreže od 20% u dodiru noge i podnice tijela što prikazuje Slika 44. Na prijelaznom rubu stražnje kosine Ahmedovog tijela očekuje se ubrzanje strujanja zbog loma u geometriji a time i lokalni skok u vrijednosti  $y^+$  te je iz tog razloga i za ovaj rub definirana maksimalna veličina elemenata 2 mm. Rast površinske mreže od navedenog ruba prema gornjoj i stražnjoj kosoj stranici također je 20%. Navedene detalje prikazuje Slika 45.



Slika 44. Progušćenje mreže na nozi Ahmedovog tijela



Slika 45. Progušćenje mreže na prijelaznom rubu stražnje kosine Ahmedovog tijela

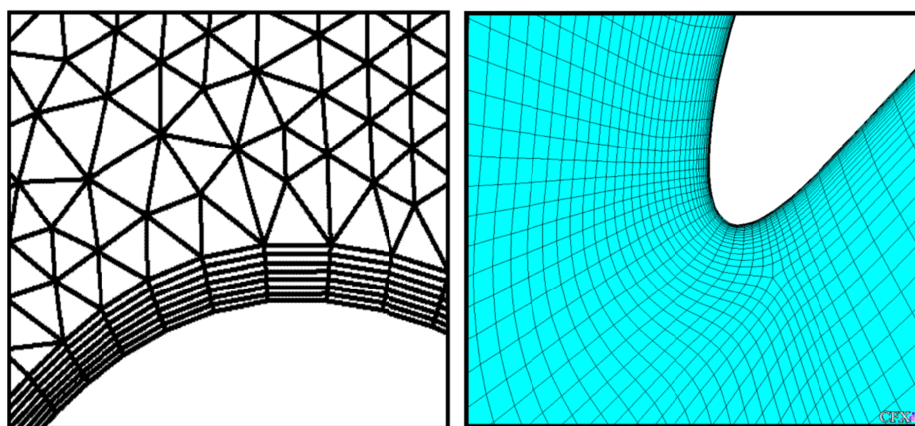
Za cijelo područje poda ispod Ahmedovog tijela također je zadana maksimalna veličina elemenata 8 mm zbog kasnijih potreba rasta prizmatskog sloja elemenata u tom području.

### 6.3 Izrada prostorne mreže Ahmedovog tijela

Izrada prostorne mreže postignuta je hibridnim pristupom u softverskom paketu ANSYS FLUENT Meshing. Pristup se sastoji od dva koraka:

- sa površina domene koje će pri simulaciji predstavljati čvrste nepropusne stijenke ekstrudiraju se trokutni prizmatski elementi,
- popunjavanje ostatka domene tetraedarskim i heksaedarskim elementima.

Slojeviti prizmatski elementi geometrijski se poklapaju sa smjerom strujanja uz stijenke što je povoljno sa stajališta smanjivanja numeričke difuzije, posebno ako se uzme u obzir da se ovi elementi nalaze u području dominiranom viskoznim efektima. ANSYS preporuča korištenje metode ekstrudiranja prizmatskih elemenata povrh temeljnog površinskog elementa u određenom omjeru (engl. *first aspect ratio*). Preporučeni omjer je veličine 5, što znači da će visina prvog prizmatskog elementa biti  $1/5$  srednje veličine površinskog elementa iznad kojeg se nalazi. Nadalje, preporučeno je ekstrudirati pet slojeva prizmatskih elemenata sa geometrijskim faktorom rasta od 1,2 tj. 20%. Ovaj pristup osigurava blagi volumni prijelaz između zadnjeg prizmatskog elementa i prvog tetraedra koji se stvara povrh njega. Kada bi razlika u veličini zadnjeg prizmatskog i prvog tetraedarskog elementa bila prevelika, numerička difuzija između tih elemenata bila bi neprihvatljivo velika. Slika 46. prikazuje loš i dobar prijelaz elemenata unutar graničnog sloja.



Slika 46. Lijevo - loš prijelaz prizmatskih elemenata u tetraedre; Desno - dobar i blag rast elemenata u graničnome sloju

FLUENT Meshing nudi hibridni pristup izradi mreže pod imenom *hexacore*, koji se temelji na popunjavanju računalne domene s nekonformalnim kartezijskim heksaedarskim elementima. Ako su rubovi domene ravne plohe, FLUENT Meshing ima mogućnost rasta ovih elemenata do granica domene te zamjene postojeće trokutne površinske mreže koja se tamo nalazi. Ova metoda vrlo je korisna za namjene gdje se koriste velike vanjske ili unutarnje domene proračuna, pošto smanjuje broj potrebnih elemenata čak i do 70%. Razlog ovome je što se relativno nekvalitetni tetraedarski elementi zamjenjuju idealnim heksaedrima koji su manje numerički difuzni te ~30% manje resursno i vremenski zahtjevni, dok posebnu prednost imaju ako je strujanje paralelno sa smjerom protezanja elemenata što je slučaj u auto i avioindustriji.

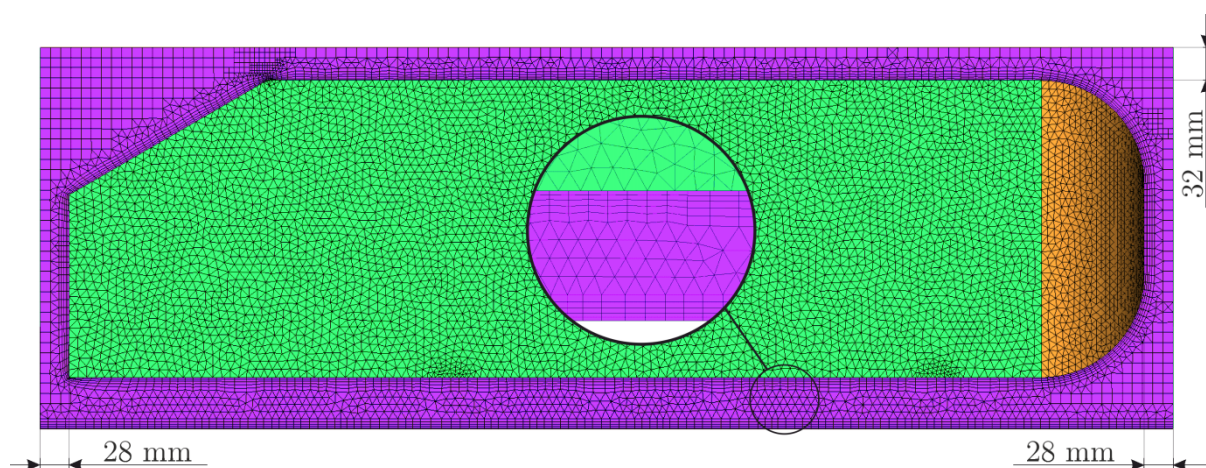
Dok ICEM CFD nudi i izradu čistih heksaedarskih mreža, taj se pristup temelji na podjeli geometrije u blokove (engl. *blocking scheme*) kojima se osigurava paralelnost elemenata uz stijenke sa smjerom strujanja. Ova metoda na kraju rezultira najkvalitetnijim i najekonomičnijim mrežama, ali proces izrade jedne mreže može trajati i do nekoliko dana – ovisno o kompleksnosti geometrije. Ova metoda koristit će se za diskretizaciju geometrije tunela te će detaljnije biti opisana u poglavlju 6.4.

S druge strane, FLUENT Meshing dopušta izradu hexacore mreže iz potpuno nestrukturirane površinske trokutne mreže koju je jednostavno postići čak i za najkompliciranije geometrije, te nakon što su odabrane inicijalne postavke, proces izrade mreže je automatiziran i traje svega nekoliko minuta.

Prvi korak pri izradi hexacore mreže jest definirati stijenke na kojima mesher mora generirati prizmatske elemente i provjeriti smjerove normala površinskih trokutnih elemenata jer one definiraju smjer rasta prizmi. Za slučaj Ahmedovog tijela to je tlo ispod samog tijela te sve stijenke tijela (tijelo i noge). Stijenkama Ahmedovog tijela dodijeljena je prethodno opisana metoda omjera prvog elementa u iznosu 5, s 5 slojeva geometrijskog rasta 20%. Tlu je dodijeljeno pravilo visine prvog elementa od 1,6 mm s istim brojem slojeva te geometrijskom funkcijom rasta s ciljem izjednačavanja vrijednosti



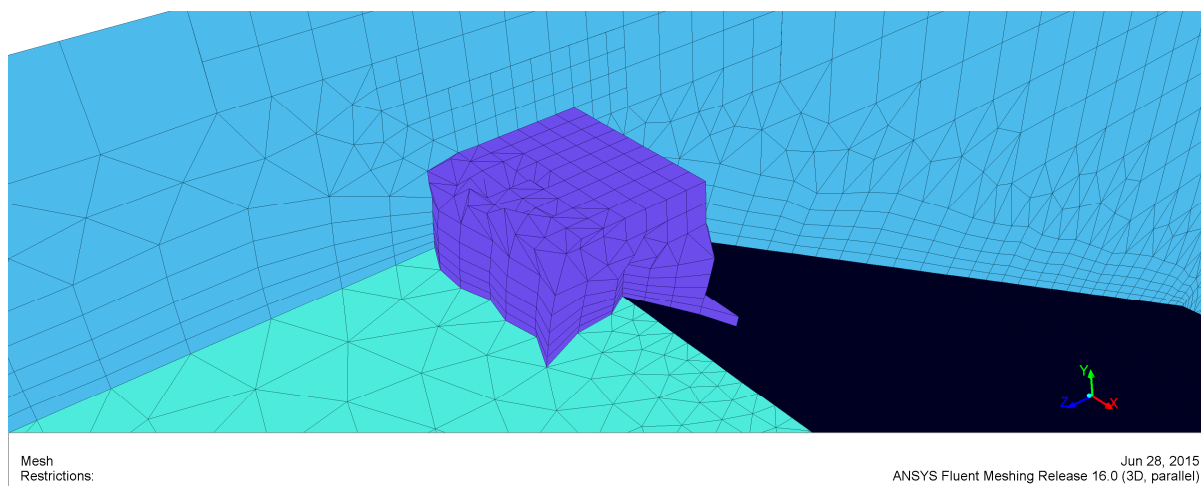
$y^+$  pri prijelazu na heksaedarsku mrežu tunela. Unatoč tome što je 1,6 mm zapravo 1/5 od veličine površinskog trokuta 8 mm, ovaj uvjet je morao biti eksplicitno zadan zbog toga što pri glačanju površinske mreže Laplace metodom duljine stranica površinskih elementa lokalno variraju što bi rezultiralo nejednolikom visinom prizmatičkih elemenata. Ova pojava ne predstavlja problem nigdje drugdje na tijelu, ali u području tla gdje su dvije plohe u dodiru, željela se postići jednolika raspodjela  $y^+$  bez skoka pri prijelazu iz prizmi na heksaedre. Slika 47. prikazuje jednoliku visinu prizmatičkih elemenata koji su generirani s tla, dok prizmatički elementi generirani s podnice Ahmedovog tijela ipak variraju u veličini (donji dio slike).



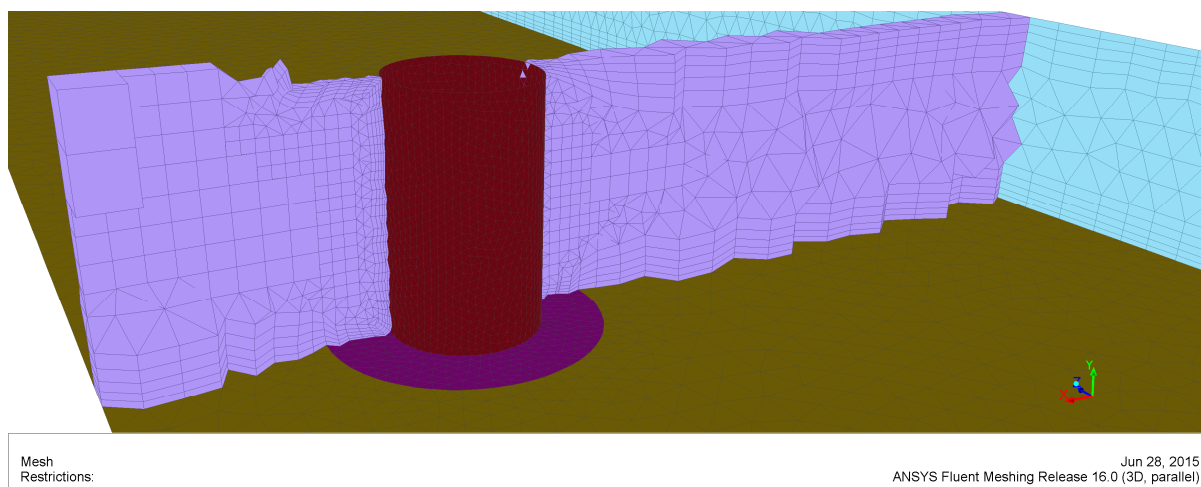
Slika 47. Ravnina simetrije hexacore mreže Ahmedovog tijela

Također, sa slike je vidljiv i izbor veličine domene Ahmedovog tijela tj. minimalnog razmaka između krajeva tijela i rubova domene. Razmak je odabran na način da se osigura nesmetan rast svih pet slojeva prizmi, jedan sloj tetraedara potrebnih za prijelaz na heksaedarske elemente te jedan sloj heksaedarskih elemenata veličine 10 mm. Na ovaj način osiguran je maksimalan broj kvalitetnih heksaedarskih elemenata unutar domene s obzirom da se prijelaz na čistu heksaedarsku mrežu tunela događa u najranijem mogućem trenutku. Također, pošto točnost nekonformalnog sučelja u FLUENT-u ovisi o blizini čvorova na stranicama mreže koje su na tom mjestu u dodiru tj. o relativnim veličinama elemenata, veličina elemenata na stranicama tunela koje ulaze

u nekonformalno sučelje također je 10 mm te se čvorovi skoro konformalno poklapaju. Ipak, nije bilo moguće stvaranje potpuno konformalne mreže zbog jednog sloja tetraedara u blizini tla domene Ahmedovog tijela tj. nejednolikog broja čvorova na prednjim, bočnim i stražnjim stranicama sučelja.



Slika 48. Detalj hibridne prostorne mreže na prijelaznom rubu stražnje kosine Ahmedovog tijela



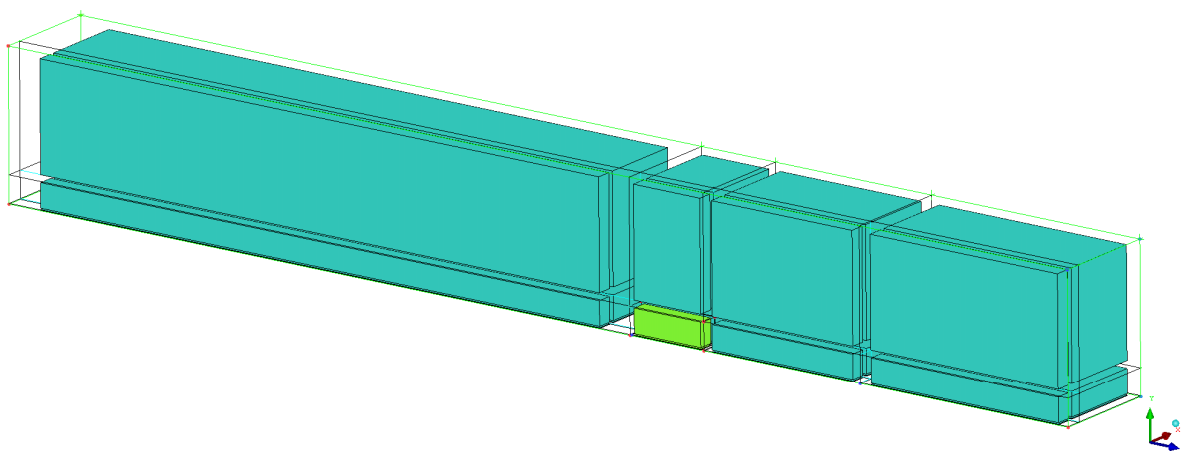
Slika 49. Detalj mreže Ahmedovog tijela na dodiru noge i tla

#### 6.4 Izrada prostorne mreže tunela za samostalno Ahmedovo tijelo

Izrada prostorne mreže dijela domene nazvanog tunel sve slučajeve ispitane u opsegu rada (samostalno tijelo i dva tijela na različitim međusobnim razmacima) postignuta je u ANSYS ICEM CFD softverskom paketu prethodno spomenutom metodom podjele

geometrije u blokove (engl. *blocking scheme*). Izrada strukturirane heksaedarske mreže može se podijeliti u nekoliko koraka:

- uvoz geometrije (engl. *geometry import*) iz CAD paketa,
- kreiranje osnovnog bloka koji obuhvaća cijeli zračni tunel,
- cijepanje osnovnog bloka na rubnim točkama bridova kvadara izrezanih iz tunela koji su diskretizirani kao Ahmedova tijela,
- uklanjanje blokova koji ne predstavljaju područje fluida,
- asocijacija rubova blokova s rubovima geometrije,
- zadavanje parametara mreže po svim rubovima dobivenih blokova (broj čvorova, funkcija rasta, smjer itd.),
- kreiranje predmreže (engl. *premesh*)
- konverzija predmreže u nestrukturiranu mrežu
- izvoz mreže (engl. *mesh export*) uz moguće skaliranje za solver

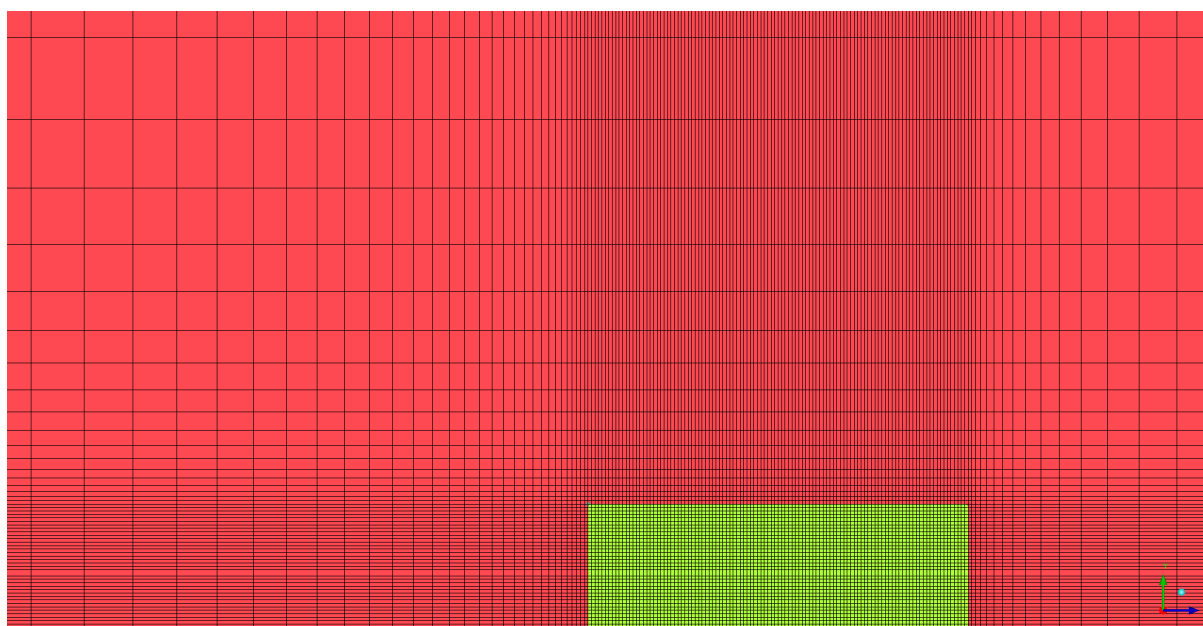


Slika 50. Struktura blokova korištena za samostalno Ahmedovo tijelo

Slika 50. prikazuje strukturu blokova dobivenu za domenu izoliranog Ahmedovog tijela. Prvi vertikalni poprečni rez glavnog bloka napravljen je na 3,1 m od ulaznog presjeka domene jer se do te točke na tlu primjenjuje rubni uvjet nepomičnog tla bez trenja, sljedeći rez bio je na početku rupe za Ahmedovo tijelo, potom na drugom kraju uzdužnog ruba rupe. Jedan horizontalni rez je na gornjem rubu rupe za Ahmedovo tijelo

te jedan kroz točku koja se nalazi 25 mm iznad ishodišta koordinatnog sustava. Razlog za rez na visini od 25 mm jest taj što će upravo to biti visina prizmatskog sloja elemenata u hexacore mreži Ahmedovog tijela te je bilo potrebno moći kontrolirati broj čvorova te funkciju rasta istih u dvije odvojene cjeline vertikalnog ruba rupe za Ahmedovo tijelo. Svijetlo zeleni blokovi (donji je visine svega 25 mm) označavaju područje koje je izostavljeno iz izrade heksaedarske mreže.

Za sve rubove koji čine rupu za Ahmedovo tijelo zadani su elementi veličine 10 mm osim u području graničnog sloja na tlu gdje je veličina elemenata usklađena s metodom omjera prvog elementa iz FLUENT Meshing-a tj. visina prvog heksaedra u dodiru s tlom jest 1,6 mm od kuda raste geometrijskim zakonom rasta od 20% kroz sljedeća 4 sloja sve do visine 25 mm. Ovakva raspodjela veličine elemenata osigurava maksimalnu točnost na nekonformalnom sučelju uz pomoć kojega će biti rješavani svi slučajevi strujanja.



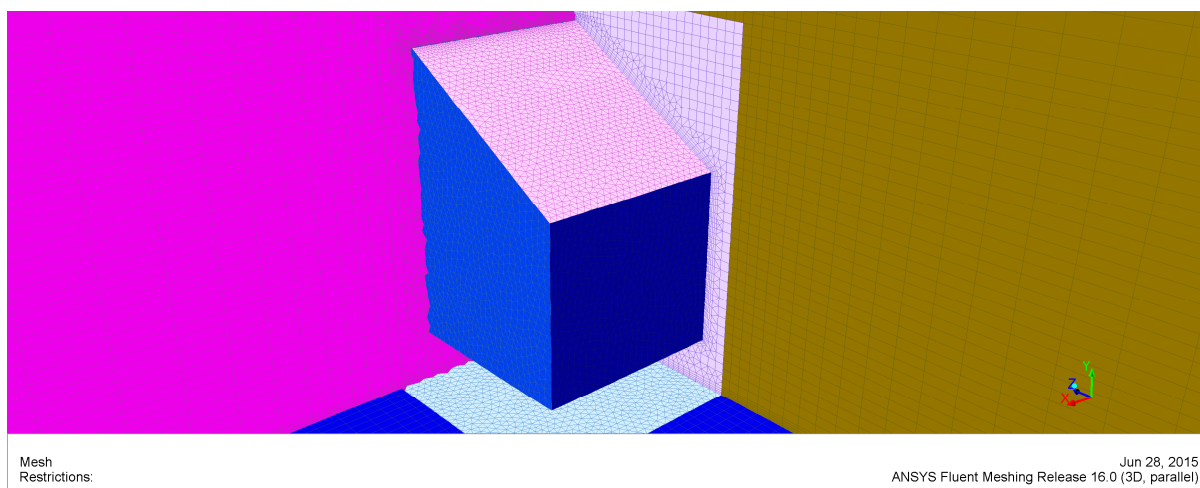
Slika 51. Prikaz ravnine simetrije tunela za samostalno tijelo u ICEM CFD-u

Rast elemenata od rubova rupe za Ahmedovo tijelo zadan je geometrijskim zakonom rasta od 20% u svim smjerovima osim straga, gdje je rast za samostalni slučaj ograničen na 10% u svrhu kvalitetnijeg obuhvaćanja struktura strujanja u vrtložnom tragu tijela.

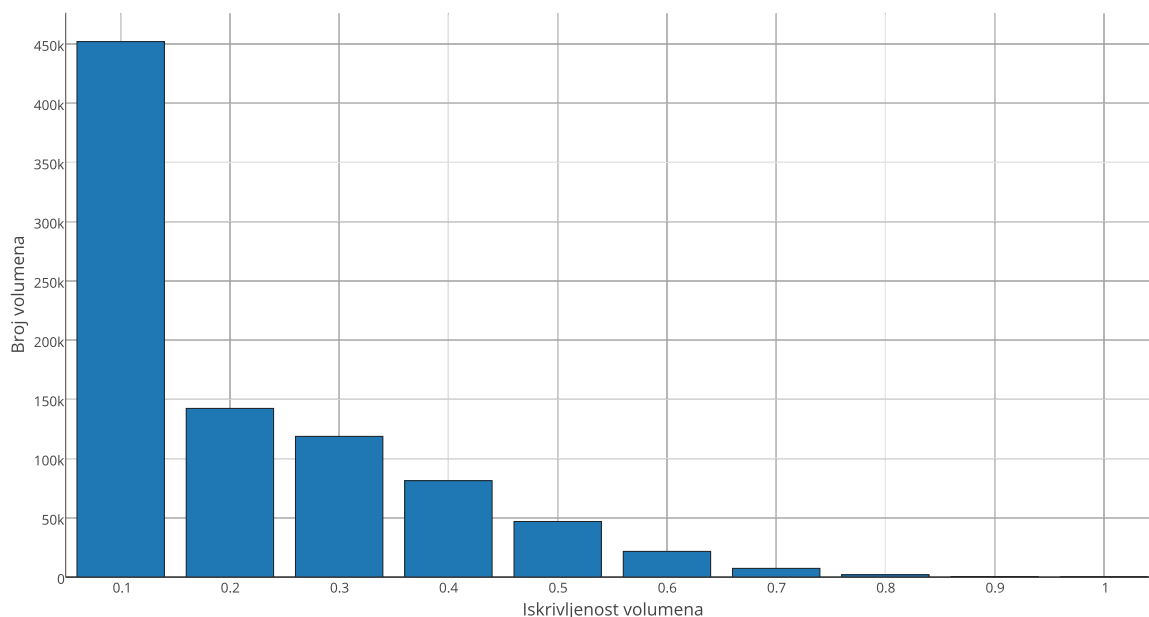
## 6.5 Spajanje mreža Ahmedovog tijela i tunela

Konačno spajanje odvojenih mreža u jedinstvenu cjelinu izvedeno je uz pomoć FLUENT Meshinga u koji su obje mreže učitane u .msh formatu. Svim površinama koje će kasnije činiti nekonformalno sučelje u solveru, dodijeljen je rubni uvjet sučelja (engl. *interface*) te su volumeni obiju mreža spojeni u jedinstveni volumen. Konačnoj mreži tada je provjerena veličina, kvaliteta te moguće pogreške nakon čega je izvezena u .msh format za rješavanje.

Sljedeće slike prikazuju detalje spojene mreže te raspodjelu kvalitete elemenata.



Slika 52. Spojena mreža samostalnog Ahmedovog tijela u tunelu

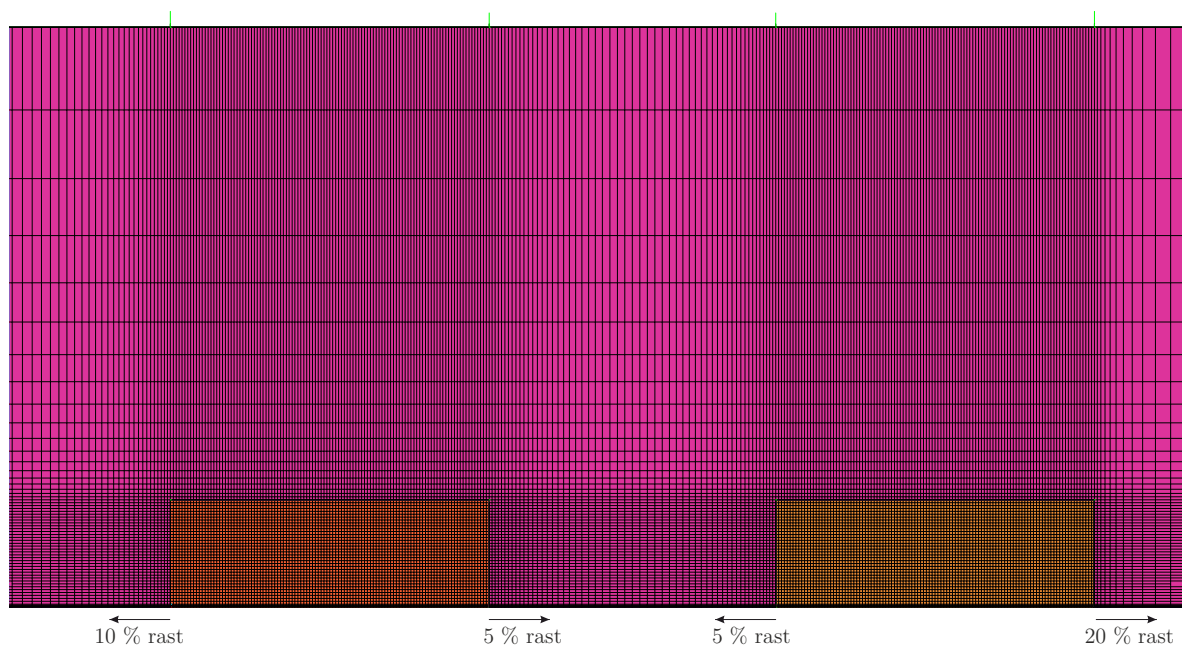


Slika 53. Raspodjela kvalitete elemenata mreže samostalnog Ahmedovog tijela

Ukupan broj elemenata za slučaj samostalnog Ahmedovog tijela bio je 872 709, s maksimalnom iskrivljenošću elemenata 0,92 dok je prosječna iskrivljenost iznosila 0,14. Broj elemenata s iskrivljenošću  $0,8 \leq Skw \leq 0,9$  koja još uvijek spada u prihvatljivu iskrivljenost jest 303, dok je samo 6 elemenata s iskrivljenošću  $0.9 < Skw < 0.92$ .

## 6.6 Izrada tunela za dva Ahmedova tijela

Pristup izradi tunela za slučajeve kada su u tunelu dva Ahmedova tijela identičan je prethodno opisanom osim pri zadavanju parametara uzdužnih rubova (broja elemenata i faktora rasta) između dvaju tijela tj. rupa. U ovome dijelu mreže zadan je geometrijski rast od 5% u oba smjera u svrhu što boljeg obuhvaćanja interakcija strujanja između dvaju tijela.



Slika 54. Faktori rasta između dvaju Ahmedovih tijela za sve tunele

## 6.7 Postavke numeričke simulacije Ahmedovih tijela

Numerička simulacija opstrujavanja Ahmedovih tijela izvedena je u komercijalnom CFD softverskom paketu ANSYS FLUENT V16 u kojem se diferencijalne jednačbe osnovnih zakona dinamike fluida diskretiziraju metodom konačnih volumena i prevode u sustav algebarskih jednačbi pogodan za numeričko rješavanje. Korišten je ostvarivi  $k - \varepsilon$

(engl. *realizable  $k - \varepsilon$* ) model turbulencije sa neravnotežnim zidnim funkcijama (engl. *non-equilibrium wall functions*) kao rubnim uvjetom uz čvrste stijenke. Korištena je diskretizacija drugog reda točnosti za sve veličine. Spregnuti rješavač jednostruke točnosti temeljen na tlaku (engl. *pressure-based coupled solver*) korišten je za rješavanje sustava linearnih algebarskih jednažbi.

### 6.7.1 Rubni uvjeti

#### 6.7.1.1 Rubni uvjet ulazne brzine (engl. *velocity-inlet*)

Rubni uvjet ulazne brzine korišten je da bi se definirala brzina strujanja fluida uz sve ostale potrebne parametre strujanja na ulazu u domenu. Vrijednosti na ulaznom presjeku domene zadane su u FLUENT-u prema Tabela 6.

Tabela 6. Rubni uvjet ulazne brzine

Svojstvo	Vrijednost
Definicija brzine	Komponente kartezijskog prostora
Referentni koordinatni sustav	Apsolutni
Početni manometarski tlak	0 Pa
Brzina strujanja	-35 m/s (u smjeru Z osi)
Definicija turbulencije	Intenzitet turbulencije i intenzitet omjera turb. viskoznosti
Intenzitet turbulencije	1.8%
Omjer turbulentne i molekularne viskoznosti	10

#### 6.7.1.2 Rubni uvjet tlaka na izlazu (engl. *pressure-outlet*)

Rubni uvjet tlaka na izlazu zahtjeva definiranje statičkog (manometarskog) tlaka na izlaznom presjeku domene. Vrijednost statičkog tlaka koristi se samo dok je strujanje podzvučno, ako strujanje u bilo kojem trenutku postane nadzvučno, vrijednost tlaka se ekstrapolira iz strujanja u unutrašnjosti domene. Parametri povratnog strujanja također moraju biti definirani za slučaj promjene smjera strujanja tijekom procesa rješavanja. Problemi sa konvergencijom često se mogu izbjeći ili smanjiti ako se definiraju realistične



vrijednosti parametara povratnog strujanja. Vrijednosti na izlaznom presjeku domene zadane su u FLUENT-u prema Tabela 7.

**Tabela 7. Rubni uvjeti tlaka na izlazu**

Svojstvo	Vrijednost
Manometarski tlak	0 Pa
Definicija protusmjernog strujanja	Normala na rubnu površinu
Definicija turbulencije	Intenzitet turbulencije i omjer turbulentne i molekularne viskoznosti
Intenzitet turbulencije	5 %
Omjer turbulentne i molekularne viskoznosti	10

Navedene vrijednosti korištene su u svim slučajevima numeričke studije. Također, izlazni presjek domene smješten je dovoljno daleko od stražnjeg kraja modela da ne utječe na strukture strujanja u vrtložnom tragu modela a povrh toga izbjegnuta je i potencijalna promjena smjera strujanja.

#### 6.7.1.3 Rubni uvjet simetrije

Rubni uvjet simetrije koristi se kada su geometrija koja se razmatra i rubni uvjeti, a samim time i očekivano strujanje, zrcalno simetrično. Također, može se koristiti i za modeliranje čvrstih stijenki bez trenja (engl. *slip condition*) u viskozim strujanjima. Pošto se u simulacijama opstrujavanja vozila utjecaji okolnih zidova tj. stijenki zračnog tunela obično zanemaruju na njima se također mogu zadavati rubni uvjeti simetrije. Podrazumijeva se da stijenke tunela moraju biti dovoljno udaljene od modela da ne bi utjecale na razvoj strujanja sa modela. Rotirajući vrtlozi koji se odvajaju sa rubova Ahmedovog tijela koji predstavljaju C-stupove (engl. *C-pillars*) vozila moraju imati dovoljno prostora za svoje širenje bez da ono bude spriječeno bočnim stjenkama tunela. Analizirajući geometriju Ahmedovog tijela uočava se da je tijelo simetrično s obzirom na svoju uzdužnu vertikalnu ravninu te je pri numeričkim simulacijama korištena samo polovica modela što je prepolovilo potrebne resurse i vrijeme rješavanja, te skratilo



vrijeme izrade mreža. Stoga je vertikalnoj ravnini koja polovi tijelo po njegovoj uzdužnoj osi dodijeljen rubni uvjet simetrije. Rubni uvjet simetrije dodijeljen je i drugoj bočnoj te gornjoj površini domene.

#### **6.7.1.4 Rubni uvjet zida**

S obzirom da je eksperiment izveden u tunelu sa nepomičnim tlom, na površini Ahmedovog tijela i tlu zadani su rubni uvjeti nepomičnog zida bez klizanja.

#### **6.7.1.5 Rubni uvjet sučelja**

Rubni uvjet sučelja (engl. *interface*) dodjeljuje se površinama mreže koje su u dodiru ali imaju različitu topologiju mreže tj. čvorovi im se ne podudaraju. Rubni uvjeti sučelja dodijeljeni su površinama rupe tunela i odvojene domene Ahmedovog tijela koje su u dodiru što prikazuje Slika 41. Rubni uvjet sučelja omogućuje strujanje između odvojenih regija fluida bez potrebe da na tom mjestu postoji konformalna mreža tj. podudaranje čvorova. Ovaj rubni uvjet često se koristi kod pristupa klizanja mreža u problemima turbostrojeva i vjetroturbina gdje je s aspekta konvergencije isplativije imati područje fluida koje rotira zajedno sa rotorom i odvojeno područje gdje se fluid giba pravocrtno.

### **6.7.2 Materijal**

Pri eksperimentalnom ispitivanju u zračnom tunelu korišten je zrak sobne temperature kao medij te su svojstva istoga zadana u FLUENT-u. Dinamička viskoznost iznosi  $1,7894 \cdot 10^{-5}$  Pa · s dok je vrijednost gustoće  $1,225$  kg/m<sup>3</sup>. Obje veličine pretpostavljene su kao konstantne zbog niske temperature od 20°C te velike brzine strujanja što znači da se efekti strujanja uslijed slobodne konvekcije mogu zanemariti.

### 6.7.3 Tehnika rješavanja

#### 6.7.3.1 Faktori podrelaksacije varijabli

Zbog nelinearnosti sustava jednadžbi koje FLUENT iterativno rješava, potrebno je kontrolirati promjenu primarne varijable  $\phi$  što se postiže podrelaksacijom koja prigušuje promjenu  $\phi$  koja proizađe tijekom iterativnog postupka. U jednostavnom obliku, nova vrijednost varijable  $\phi$  u čvoru konačnog volumena ovisi o staroj vrijednosti  $\phi_{\text{staro}}$ , izračunatoj promjeni  $\Delta\phi$ , varijable  $\phi$ , i faktoru podrelaksacije  $\alpha$  prema sljedećem izrazu [19]:

$$\phi = \phi_{\text{staro}} + \alpha\Delta\phi \quad (5.15)$$

Faktore podrelaksacije za varijable treba podesiti tako da se priguše velike oscilacije tih varijabli i omogući brža konvergencija ka konačnom rješenju. Korištenjem manjih faktora podrelaksacije proces konvergencije se usporava jer solver u svaku sljedeću iteraciju ulazi sa manjim postotkom promjene svih veličina. Konačno rješenje prema kojemu iterativni proces konvergira ne ovisi o faktorima podrelaksacije, ali brzina kojom će se do tog rješenja doći uvelike ovisi. Stoga, faktori podrelaksacije zadaju se na temelju preporuka i iskustva. Pregled vrijednosti faktora podrelaksacije korištenih u ovim simulacijama daje Tabela 8.

Tabela 8. Faktori podrelaksacije za slučajeve strujanja oko Ahmedovog tijela

Varijabla	Vrijednost $\alpha$
Tlak $p$	0.25
Brzina $v$	0.25
Turbulentna kinetička energija $k$	0.8
Disipacija turbulentne kinetičke energije $\varepsilon$	0.8
Turbulentna viskoznost $\mu_t$	0.95

#### 6.7.3.2 Podrelaksacija jednadžbi - Courantov broj (CFL)

Podrelaksacija jednadžbi, poznata i kao implicitna podrelaksacija, koristi se u spregnutom rješavaču temeljenom na tlaku (engl. *pressure-based coupled solver*) za

stabilizaciju konvergencije vanjskih nelinearnih jednadžbi. Početna vrijednost Courantovog broja u FLUENT-u je 200, što je pri rješavanju Ahmedovog tijela nagiba stražnje kosine  $30^\circ$  rezultiralo oscilacijama bezdimenzijskih koeficijenata aerodinamičkih sila te reziduala. Smanjenjem Courantovog broja na 100 amplituda oscilacija smanjila se nekoliko puta, a postavljanjem vrijednosti na 50 postignuta je monotona konvergencija bez oscilacija rješenja te je ta vrijednost korištena pri rješavanju svih slučajeva.

### **6.7.3.3 Spregnuti rješavač temeljen na tlaku (engl. *pressure-based coupled solver*)**

ANSYS FLUENT pruža nekoliko vrsta rješavača koji se općenito mogu podijeliti na one temeljene na tlaku (engl. *pressure-based solver*) te one temeljene na gustoći (engl. *density-based solver*). Rješavači temeljeni na tlaku uzimaju brzinu i tlak (ili korekciju tlaka) kao osnovne veličine te ih mogu rješavati na dva načina: sekvencijalno – odijeljeni rješavač (engl. *segregated solver*), i simultano – spregnuti rješavač (engl. *coupled solver*). Odijeljeni rješavač temeljen na tlaku primjenjiv je na široki raspon režima strujanja od nestlačivih strujanja malih brzina do brzih stlačivih strujanja, zauzima manje prostora u radnoj memoriji računala i dopušta veću fleksibilnost u toku rješavanja. Spregnuti rješavač temeljen na tlaku primjenjiv je na većinu strujanja sa jednom fazom (medijem) te brže dolazi do rezultata u odnosu na odijeljeni rješavač. Zauzima 1,5 – 2 puta više radne memorije i nije dostupan za određene slučajeve (višefazna strujanja, periodičke masene protoke i NITA<sup>9</sup>). Iako jedna iteracija spregnutog rješavača temeljenog na tlaku traje nekoliko puta dulje od one u odijeljenom rješavaču, broj potrebnih iteracija za postizanje konvergiranog rješenja je za više od reda veličine manji te se ukupno vrijeme rješavanja smanjuje iz sati u minute.

Rješavač temeljen na gustoći je već u svojoj osnovnoj izvedbi spregnut tj. *coupled solver* koji kao osnovne veličine uzima gustoću, brzinu i unutrašnju energiju.

---

<sup>9</sup> Non-Iterative Time Advancement je shema vremenskog marširanja u FLUENT-u napravljena s ciljem ubrzanja rješavanja nestacionarnih proračuna, što se postiže smanjenjem greške cijepanja (engl. *splitting error*) koristeći vremenski „jeftinije“ pod-iteracije unutar vremenskog koraka [19].

#### 6.7.3.4 Prostorna diskretizacija veličina

Pregled korištenih shema prostorne diskretizacije svih veličina dan je sljedećom tablicom.

Tabela 9. Sheme prostornih diskretizacija veličina

Veličina	Shema
Gradijenti	Green-Gauss node based
Tlak	2nd order
Brzina	2nd order upwind
Turbulentna kinetička energija	2nd order upwind
Disipacija turb. kin. energije	2nd order upwind

Prema zadanim postavkama ANSYS FLUENT pohranjuje diskretne vrijednosti skalara  $\phi$  u centrima konačnih volumena. Međutim, vrijednosti na površinama konačnog volumena potrebne su za izračun protoka veličina koje prolaze kroz površine konačnih volumena te se moraju interpolirati iz vrijednosti pohranjenih u centrima konačnih volumena, što se postiže uzvodnim shemama (engl. *upwind schemes*). Uzvodno znači da se vrijednost na površini konačnog volumena  $\phi_f$  dobiva iz veličina u čvorovima koji se u odnosu na taj volumen nalaze uzvodno. ANSYS FLUENT pruža na izbor nekoliko uzvodnih shema: 1st order upwind, 2nd order upwind, QUICK, 3rd order MUSCL itd., dok su za ovaj rad relevantne samo 1st i 2nd order upwind sheme.

Kada su dovoljni rezultati prvog reda točnosti koristi se uzvodna shema prvog reda (engl. *1st order upwind scheme*) koja pretpostavlja da je vrijednost na površini volumena  $\phi_f$  jednaka vrijednosti u čvoru prvog volumena koji se nalazi uzvodno od nje. Ova shema omogućuje lakšu konvergenciju rezultata na štetu točnosti te se obično koristi na početku iterativnog rješavanja problema ili preliminarna istraživanja.

Kada su potrebni rezultati drugog reda točnosti koristi se uzvodna shema drugog reda (engl. *2nd order upwind scheme*) koja vrijednosti na površinama volumena  $\phi_f$  računa koristeći pristup višedimenzijske linearne rekonstrukcije. Višedimenzijska linearna rekonstrukcija je metoda korištenja razvoja rješenja u čvoru konačnog volumena uz pomoć Taylorovog reda na prostor oko čvora i to koristeći vrijednosti u dva uzvodna

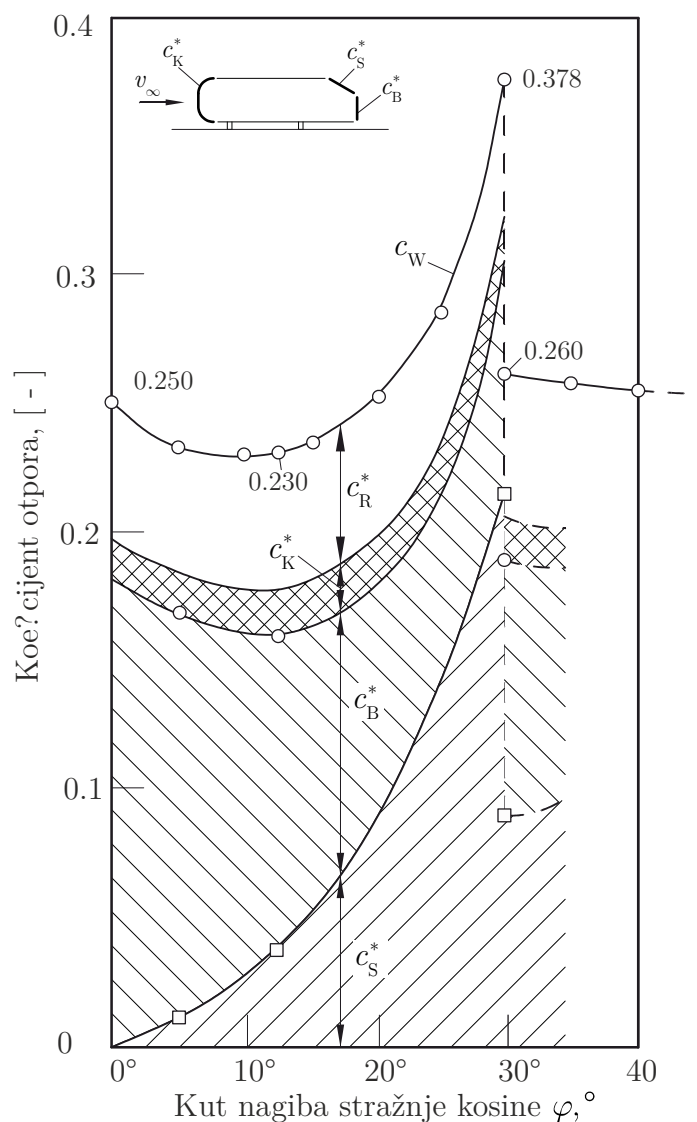
čvora. Što se konvergencije tiče, ova shema je nestabilnija od 1st order upwind sheme te se rješavanje problema na nju prebacuje kada je konvergencija već krenula u pravom smjeru i cilj je postići točnije rezultate.

Gradijenti se koriste ne samo za rekonstrukciju vrijednosti skalara na površinama konačnih volumena, već i za izračun sekundarnih difuznih veličina te derivacija brzine. Gradijent  $\nabla\phi$  odabrane veličine  $\phi$  koristi se za izračun konvektivnih i difuznih veličina u jednadžbama kontinuiteta. U ANSYS FLUENT-u gradijenti se mogu računati uz pomoć sljedećih metoda: Green-Gauss Cell-Based, Green-Gauss Node-Based i Least Squares Cell-Based.

Pri korištenju Green-Gauss Cell-Based metode vrijednost veličine na površini volumena  $\phi_f$  uzima se kao aritmetička sredina vrijednosti pohranjenih u čvorovima okolnih konačnih volumena, dok Green-Gauss Node-Based metoda za izračun vrijednosti veličine  $\phi_f$  koristi aritmetičku sredinu vrijednosti pohranjenih u čvorovima koji ograničavaju površinu. Vrijednosti u čvorovima računaju se uz pomoć težinskog prosjeka konačnih volumena koji okružuju čvor i to na način da se rekonstruira točna vrijednost linearne funkcije u čvoru iz okolnih vrijednosti pohranjenih u centrima volumena rješavanjem ograničenog problema minimizacije, čime je očuvana točnost drugoga reda prostorne diskretizacije. Ova metoda je resursno najzahtjevnija ali i najtočnija za hibridne i tetraedarske (trokutne) mreže poput one korištene u ovome radu.

## 6.8 Strukture strujanja u aerodinamičkom tragu Ahmedovog tijela

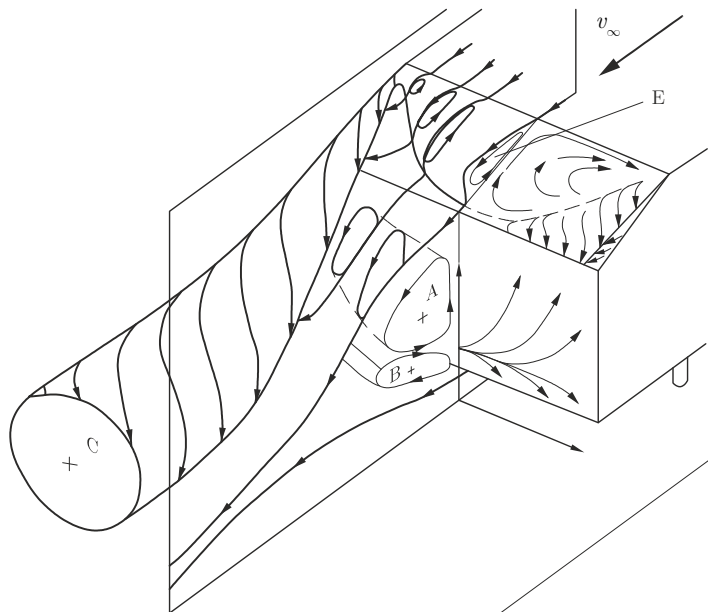
Prema istraživanjima Ahmed et al. [20] uočeno je da sila otpora zraka spomenutog tijela ovisi primarno o kutu nagiba stražnje kosine koja je ujedno i najveći sudionik u raspodjeli otpora oblika. Promjenom kuta nagiba stražnje kosine od  $0^\circ$  do  $40^\circ$  dobivena je zavisnost sile otpora (njem. *widerstand*,  $c_W$ ) o navedenom kutu što prikazuje Slika 55. Udio sile trenja (njem. *reibung*,  $c_R$ ) jednolik je za većinu razmatranih slučajeva i iznosi  $\sim 15\%$ .



Slika 55. Ovisnost koeficijenta otpora o kutu nagiba stražnje kosine Ahmedovog tijela

Iz slike je vidljivo da vrijednost otpora postiže svoj maksimum kada je kut nagiba stražnje kosine  $30^\circ$ . Također, uočeno je da se s povećanjem kuta nagiba preko  $30^\circ$  koeficijenti otpora značajno smanjuju te poslije toga ostaju konstanti. Stoga su Ahmed et al. proveli studiju vizualizacije strujanja s ciljem analize utjecaja kuta nagiba stražnje kosine na koeficijent otpora zraka.

Opaženo je da se za kut nagiba stražnje kosine  $30^\circ$  dio odvojenog strujanja koji kreće s početnog ruba stražnje kosine zavrće u snažne trodimenzionalne rotirajuće vrtloge s C-stupova. Također, opaženo je da se dio strujanja koji se odvaja s početnog ruba stražnje kosine ponovno sljepljuje na njezinom krajnjem rubu prije dodira sa stražnjom stranicom tijela. Pri dolasku strujanja do krajnjeg ruba stražnje kosine te stražnjeg ruba podnice tijela, ono se ponovno odvaja te čini dva recirkulirajuća vrtloga koji se nalaze jedan iznad drugoga u tragu tijela i suprotnog su smjera rotacije (A i B na Slika 56.) Ovi vrtlozi nazivaju se kvazistatičkim dvodimenzionalnim vrtlozima.

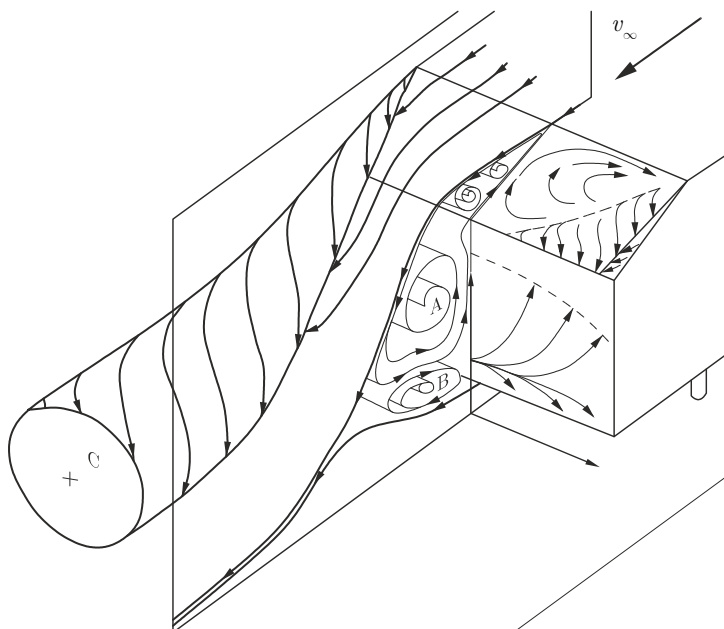


Slika 56. Strukture strujanja iza Ahmedovog tijela (kut kosine  $30^\circ$ ) prema Ahmed et al.

Istraživanjem je ustanovljeno da su uzdužni vrtlozi s C-stupa i gornji dvodimenzionalni vrtlog A pod visokim utjecajem kuta nagiba stražnje kosine dok je donji dvodimenzionalni vrtlog B većinom ovisan o strujanju ispod modela te visini oslanjanja modela (udaljenosti od tla). Pri kutu nagiba stražnje kosine od  $30^\circ$ , opaženo je da

odvojeni mjehurić E postiže svoju maksimalnu veličinu tvoreći vrtlog oblika potkove (engl. *horseshoe vortex*) na stražnjoj kosini tijela, što doprinosi snazi vrtloga C-stupova i potiče strujanje na ponovno spajanje prije konačnog odvajanja na dnu stražnje kosine. Dodajmo k tome, da je odvojeni mjehurić E područje u kojemu strujanje mijenja smjer te smanjuje tlak na stražnjoj površini što naposljetku dovodi do povećanja otpora oblika tijela.

Vino et al. su 2004. godine eksperimentalno ispitivali Ahmedovo tijelo kuta nagiba stražnje kosine  $30^\circ$  [22] te pronašli određene razlike u strukturama strujanja u odnosu na izvorni rad Ahmed et al. Opaženo je da gornji dvodimenzionalni vrtlog A dobiva energiju iz odvojenog strujanja preko stražnje kosine tijela tj. da se strujanje ne spaja prije stražnjeg ruba kosine te ponovno odvaja na stražnjoj bazi (vertikalnoj stranici tijela) što je suprotno topologiji strujanja predloženoj od Ahmed et al. Revidirana struktura strujanja u pozadini Ahmedovog modela kuta nagiba stražnje kosine  $30^\circ$  prema Vino et al. [22] prikazana je na sljedećoj slici.



Slika 57. Strukture strujanja iza Ahmedovog tijela (kut kosine  $30^\circ$ ) prema Vino et al.

Na taj način zaključeno je da vrtlog oblika potkove kojeg su predložili Ahmed et al., unutar kojeg se nalazi odvojeni mjehurić E, sada ostaje djelomično otvoren te se strujanje miješa s gornjim dvodimenzionalnim vrtlogom A.



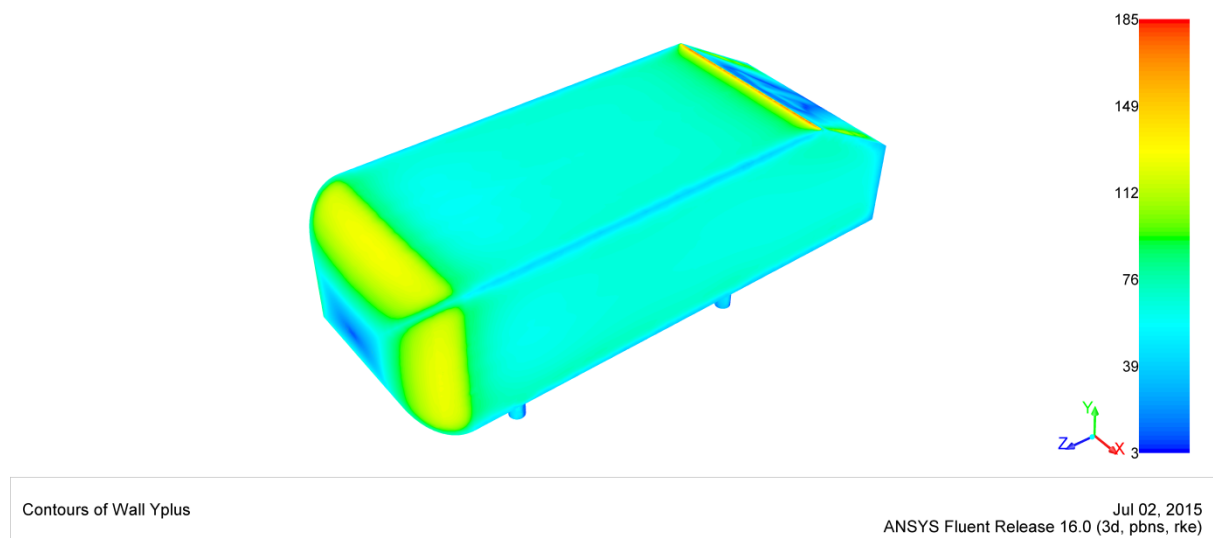
## 6.9 Rezultati numeričke simulacije samostalnog Ahmedovog tijela

Prateći do sada iznesen postupak izrade numeričke simulacije dobiveni su rezultati koje prikazuje Tabela 10. Rezultati izvornog eksperimenta Ahmed et al. [20], označeni crvenom bojom (r.br. 1), uvršteni su u rad zbog kasnije usporedbe raspodjele koeficijenata otpora triju površina ( $c_k, c_s$  i  $c_b$ ) označenih na Slika 55. sa rezultatima simulacije. Rezultati referentni za ovaj slučaj tj. oni prema kojima su modelirani virtualni zračni tunel te zadavani rubni uvjeti, su rezultati istraživanja Vino et al. [9] označeni plavom bojom u Tabela 10 (r.br. 2). Iznosi razlika koeficijenata otpora i uzgona za rezultate simulacije (r.br. 3) odnose se na rezultate istraživanja Vino et al.

Tabela 10. Rezultati eksperimenata i simulacije izoliranog Ahmedovog tijela (kut kosine  $30^\circ$ )

#	$n$ , broj volumena	Tretman zida	$y^+$ (avg.)	FAR/n/rast prizmi	$C_D$	$C_L$	$\Delta C_D, \%$	$\Delta C_L, \%$
1					0,378	-	-	-
2					0,320	0,540	-	-
3	872 709	NWF	70	5/5/1.2	0,3235	0,4135	+1,09	-23,43

Zbog kvalitetnog pristupa izradi mreža, studija mrežne nezavisnosti (engl. *grid independence study*) nije izvođena. Raspodjela  $y^+$  po površinama Ahmedovog tijela dana je sljedećom slikom.



Slika 58. Raspodjela  $y^+$  na samostalnom Ahmedovom tijelu

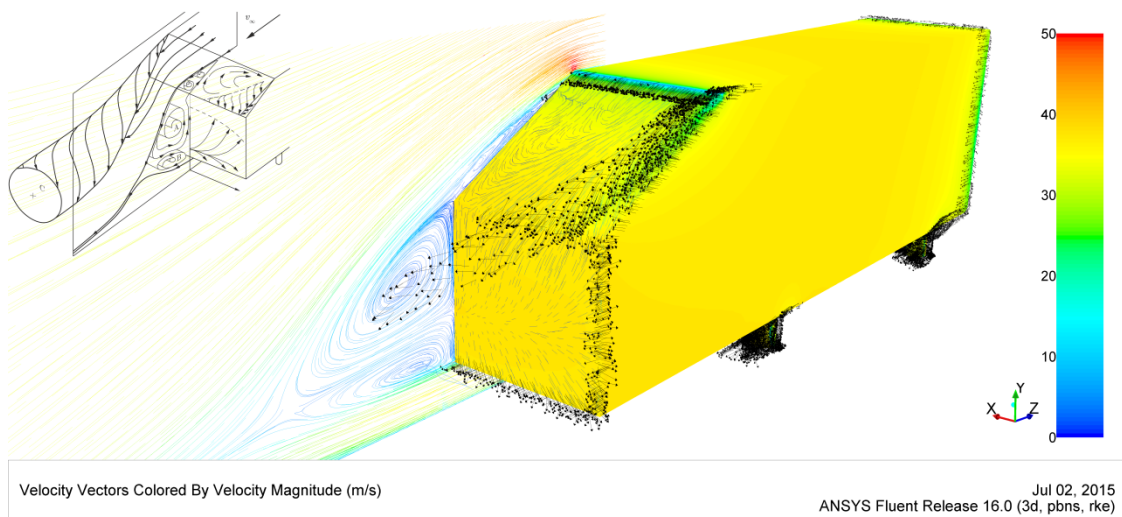
Valjanost rezultata simulacije provjerena je i usporedbom struktura strujanja u tragu Ahmedovog tijela. Na Slika 59. prikazano je Ahmedovo tijelo s raspodjelom bezdimenzijskog koeficijenta tlaka  $C_p$  na svojim površinama, dok strujnice u ravni simetrije i na stražnjim stranicama tijela (engl. *oil flow*) prikazuju raspodjelu brzine strujanja. Također, u svrhu dočaravanja rotirajućeg vrtloga koji se odvaja s C-stupa tijela kreirana je i izo-površina konstantnog  $Q$ -kriterija na kojoj su prikazani vektori brzine strujanja u crnoj boji.

$Q$ -kriterij bio je prvi trodimenzionalni kriterij vrtložnosti temeljen na Jakobijanski-nezavisnom kriteriju vrtložnosti [23] koji definira vrtlog kao dio prostora gdje vrijedi

$$Q = \frac{1}{2} \left[ |\mathbf{\Omega}|^2 - |\mathbf{S}|^2 \right] > 0 \quad (5.16)$$

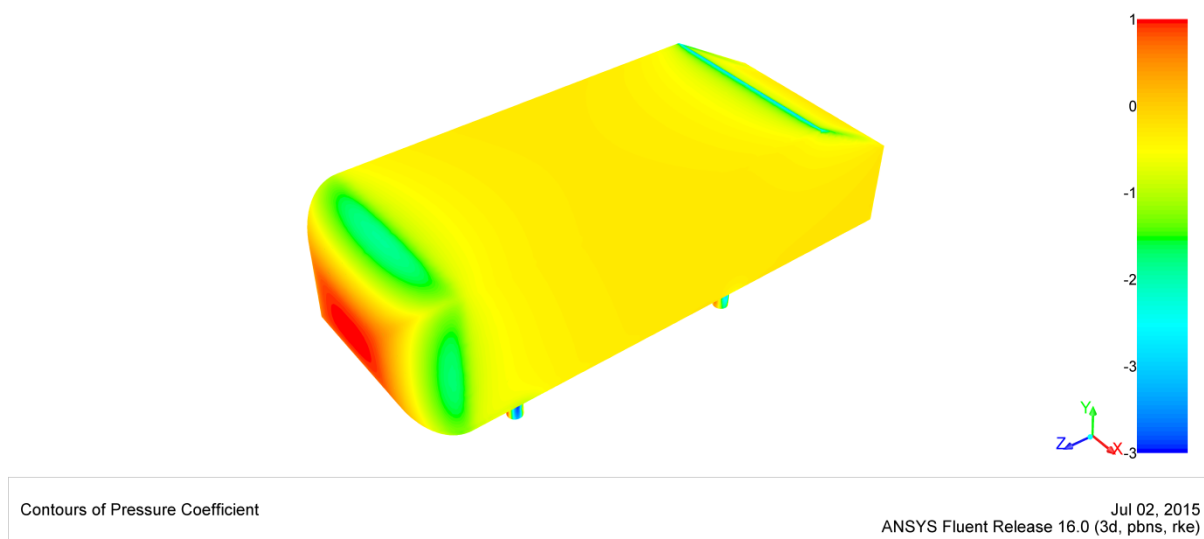
tj. gdje je Euklidska norma tenzora vrtložnosti  $\mathbf{\Omega}$  dominantna nad brzinom promjene deformacije  $\mathbf{S}$ . Uz pomoć izraza (5.16) definiran je  $Q$ -kriterij kao prilagođena funkcija polja unutar FLUENT-a čime je omogućeno stvaranje izo-krivulje konstantnog  $Q$ -kriterija kao metode prikaza vrtloženja u aerodinamičkom tragu Ahmedovog tijela.

Usporedbom Slika 59. sa shematskim prikazom strujanja koje su ustanovili Vino et al. prikazanog na Slika 57. vidljive su sve strukture strujanja opažene u eksperimentu.



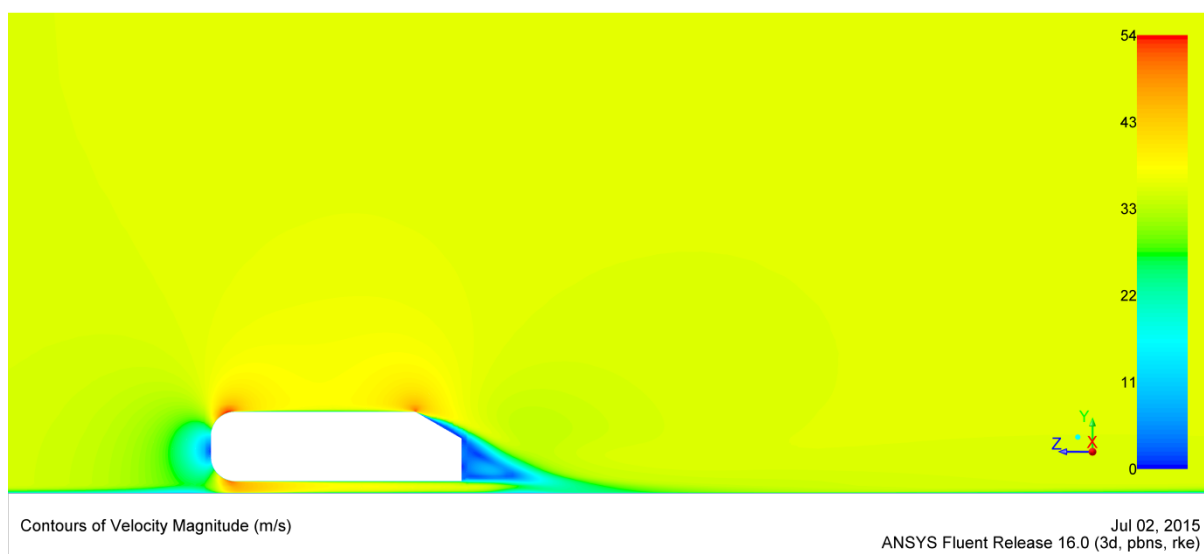
Slika 59. Shematski i simulirani prikaz struktura toka u tragu vozila

Raspodjela bezdimenzijskog koeficijenta tlaka  $C_p$  s pogledom na prednji dio tijela prikazana je na Slika 60., pri čemu je vidljiva točka stagnacije na čeonj površini tijela kao i nagli pad  $C_p$ -a na mjestu ubrzanja zalijepljenog strujanja na zaobljenim rubovima čeonj površine. Efekt ubrzanja strujanja na  $C_p$  uočljiv je i na nogama Ahmedovog tijela, gdje se ujedno javlja i lokalni minimum vrijednosti tlaka te maksimum brzine strujanja.



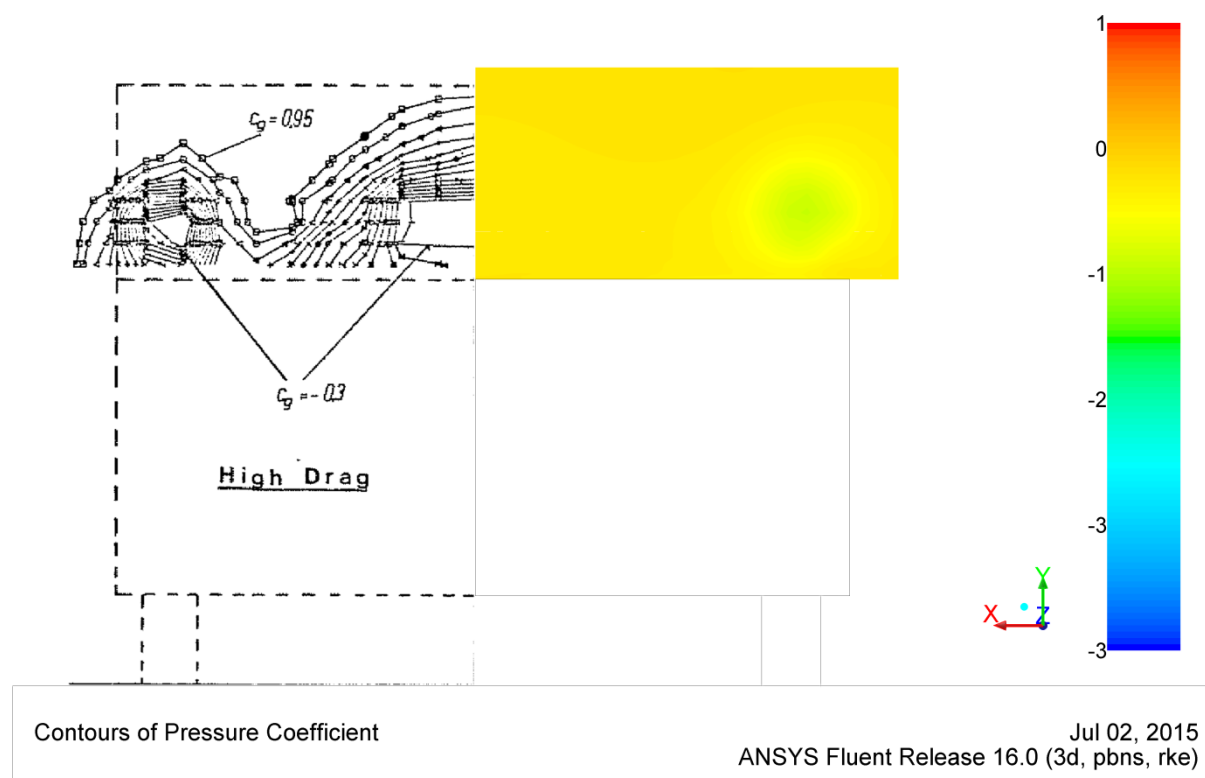
Slika 60. Konture raspodjele  $C_p$  na samostalnom Ahmedovom tijelu

Detalnija raspodjela brzine strujanja u ravnini simetrije prikazana je sljedećom slikom, pri čemu je vidljivo da se strujanje nakon odvajanja na rubu stražnje kosine ne lijepi ponovo na površinu već napaja gornji od dva vrtloga u aerodinamičkom tragu tijela.



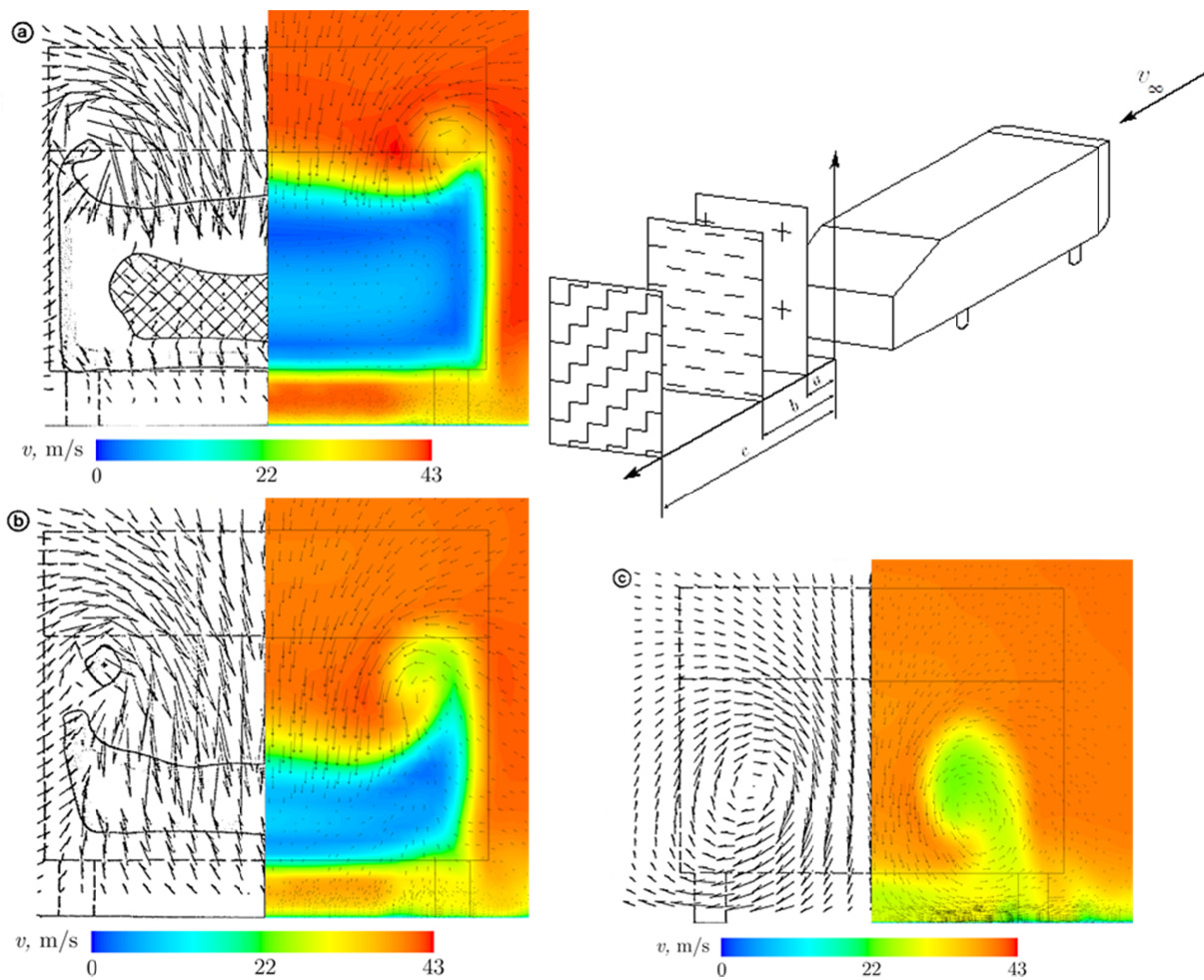
Slika 61. Konture raspodjele brzine u ravnini simetrije Ahmedovog tijela

Iako Vino et al. ne daju rezultate vizualizacije strujanja pri izvođenju eksperimenta, usporedene su izobare na površini koja leži u ravnini stražnje vertikalne stranice tijela s opažanjima izvornog ispitivanja Ahmed et al. za slučaj kuta nagiba stražnje kosine  $30^\circ$ , te je pronađeno izvrsno slaganje eksperimenta i simulacije. (Slika 62.)

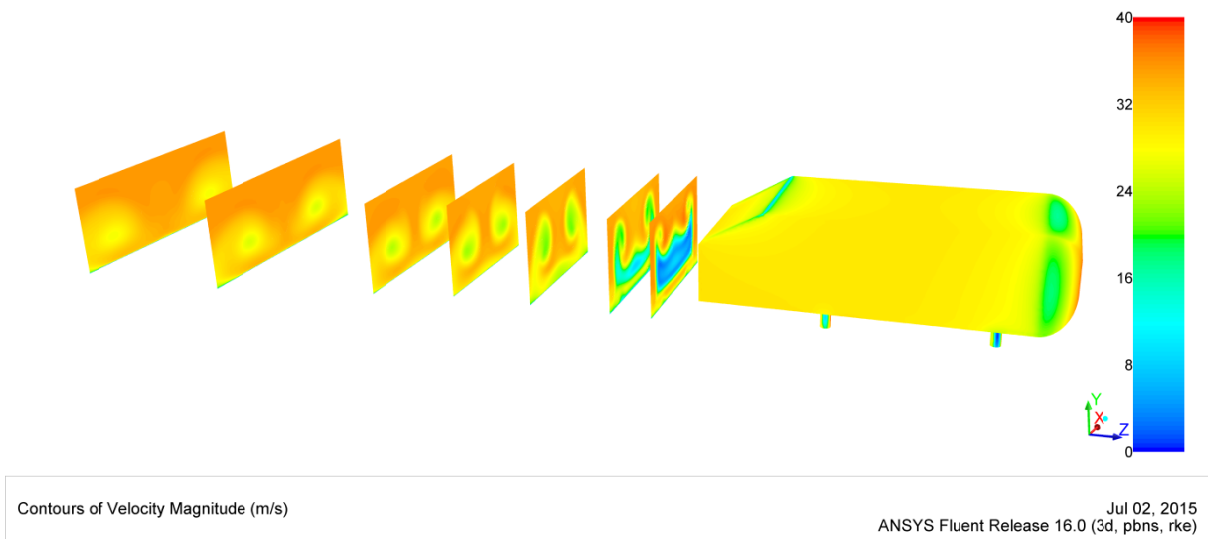


Slika 62. Usporedba kontura raspodjele  $C_p$  u pozadini tijela s rezultatima Ahmed et al.

Iako niti jedan od autora nije pružio prikaze mjerenja brzine u ravninama iza tijela za slučaj kuta nagiba kosine  $30^\circ$ , napravljena je kratka usporedba s postojećim rezultatima za Ahmedovo tijelo s kutom nagiba kosine od  $25^\circ$  prema Ahmed et al., te rezultatima numeričke simulacije istog. Slika 63. prikazuje konture i vektore brzine u ravninama iza Ahmedovog tijela kuta nagiba stražnje površine  $25^\circ$  na udaljenostima  $a = 0,077 \text{ m}$ ,  $b = 0,192 \text{ m}$  i  $c = 0,479 \text{ m}$ . Vidljivo je izvrsno slaganje rezultate eksperimenta i numeričke simulacije u svim presjecima. Slika 64. prikazuje raspodjelu kontura brzine iza Ahmedovog tijela na udaljenostima  $0.125 \leq x/L \leq 2$  gdje je  $L = 1,044 \text{ m}$  tj. duljina tijela.



Slika 63. Konture i vektori raspodjele brzine na mjestima a, b i c iza Ahmedovog tijela ( $25^\circ$  kut nagiba kosine) prema eksperimentu i numeričkoj simulaciji



Slika 64. Konture raspodjele brzine strujanja na mjestima  $x/L = 0.125, 0.25, 0.5, 0.75, 1.5$  i 2 iza Ahmedovog tijela ( $30^\circ$  kut nagiba kosine)

Iz Slika 64. može se primijetiti odgovarajuća korelacija između rezultata za Ahmedovo tijelo s kutom nagiba kosine  $25^\circ$  i  $30^\circ$ . Također, zbog kvalitete mreže u aerodinamičkom

tragu tijela koja ne opada s udaljenošću primjećuju se jasne granice vrtloga koji kreću s C-stupova tijela čak i na udaljenosti  $x / L = 2$ .

Ahmed et al. u izvornom radu iz 1984. dali su postotak doprinosa različitih površina tijela u ukupnom koeficijentu otpora zraka prema Slika 55. Važno je napomenuti da se radi o koeficijentima otpora oblika tj. tlaka te da su iz simulacije također uvrštene samo vrijednosti koeficijenata otpora uslijed tlaka. Sljedeća tablica daje usporedbu rezultata simulacije samostalnog Ahmedovog tijela s navedenim eksperimentom.

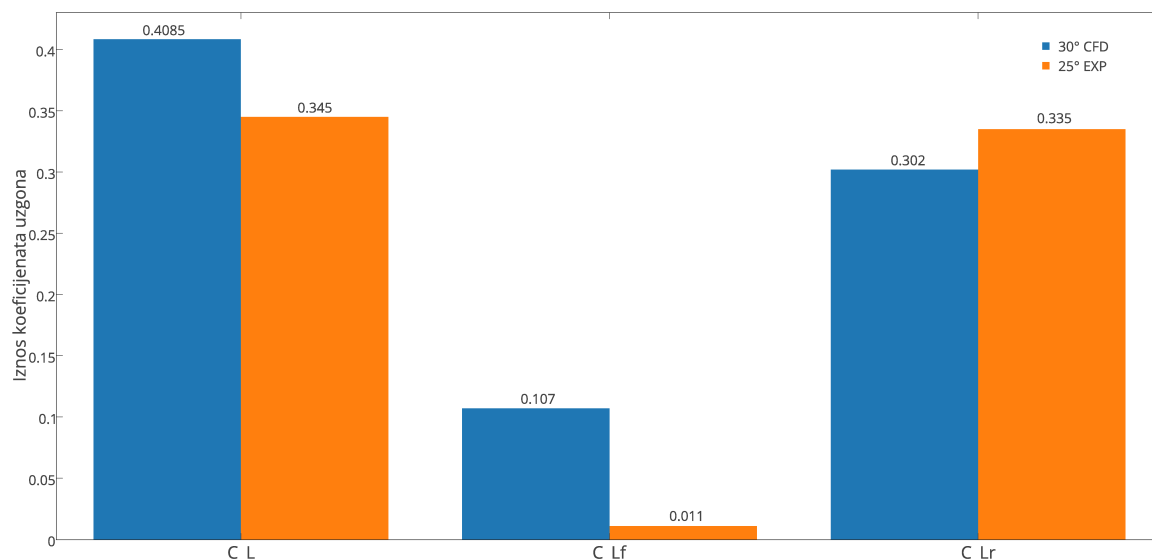
**Tabela 11. Sudionici otpora oblika Ahmedovog tijela kuta nagiba stražnje kosine  $30^\circ$**

Kut nagiba stražnje površine	$c_p$	$c_K / c_D$ [%]	$c_S / \% c_D$	$c_B / \% c_D$
$30^\circ$ eksperiment	<b>0,321</b>	<b>0,016 ; 4,98</b>	<b>0,213 ; 66,36</b>	<b>0,092 ; 28,66</b>
$30^\circ$ simulacija	<b>0,260</b>	<b>0,028 ; 10,74</b>	<b>0,1755 ; 67,34</b>	<b>0,057 ; 21,87</b>

Rezultati iz Tabela 11. i Slika 55. demonstriraju mali doprinos prednjeg dijela Ahmedovog tijela  $c_K$  ukupnom otporu oblika tijela. U eksperimentu je za sve konfiguracije stražnjeg kraja tijela udio otpora oblika prednjeg dijela tijela bio konstantan i iznosio  $c_K = 0.016$ . Zaključak koji se iz ovoga može izvući je da je interferencija strujanja između prednjeg i stražnjeg dijela tijela malena, što bi moglo biti posljedica relativno dugačkog srednjeg dijela tijela. Najveći doprinos ukupnom otporu oblika Ahmedovog tijela daju stražnje površine i to primarno kosina. Udio otpora uslijed smičnih sila fluida za sve eksperimentalno ispitivane konfiguracije iznosi  $\sim 15\%$ , što je tipično za opstrujavanja tupih tijela poput cestovnih vozila, vlakova, građevina itd.

Jedina studija u kojoj je istraživana raspodjela koeficijenta uzgona na osloncima Ahmedovog tijela jest ona W. Meile et al. [24] iz 2011. godine. Autori su eksperimentalno i numerički istraživali strujanje oko Ahmedovih tijela kuta nagiba kosine  $25^\circ$  (predkritični nagib pri kojem je strujanje još uvijek zalijepljeno na kosini tijela) i  $35^\circ$  (nadkritični nagib pri kojemu je strujanje potpuno odvojeno). S obzirom da

je strujanje za slučaj kuta nagiba kosine od  $30^\circ$  koje je predmet ovoga rada sličnije onome na Ahmedovom tijelu s kutom nagiba  $25^\circ$ , sljedećom slikom dana je usporedba raspodjela koeficijenta uzgona na prednjim i stražnjim nogama tijela.

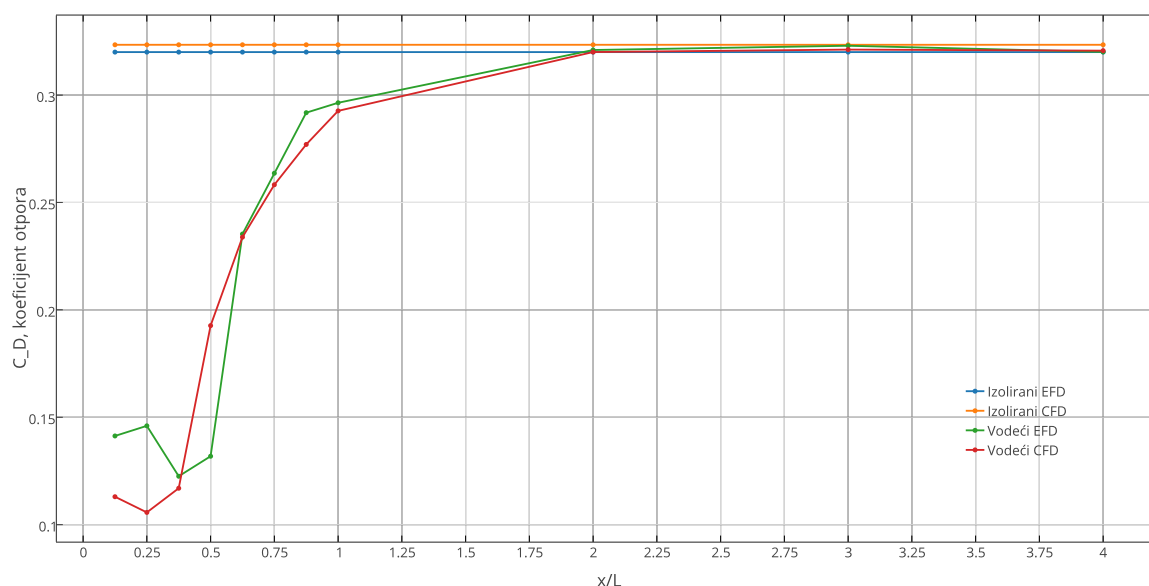


Slika 65. Raspodjela koeficijenta uzgona na prednji i stražnji oslonac tijela

## 6.10 Rezultati numeričke simulacije dvaju Ahmedovih tijela

Efekti *draftinga* dvaju tijela numerički su simulirani te uspoređeni s eksperimentalnim ispitivanjem Vino et al. [9] izvedenim 2004. godine u RMIT University zračnom tunelu. Korištena su dva Ahmedova tijela kuta nagiba stražnje kosine  $30^\circ$ , dok je međusobni razmak tijela iznosio  $0.125 \leq x/L \leq 4$ , gdje je  $L$  duljina Ahmedovog tijela (1.044 m). Korak povećanja razmaka iznosio je  $0.125L$  do udaljenosti jedne duljine Ahmedovog tijela, te  $1L$  sve do udaljenosti od  $4L$ . Brzina strujanja pri eksperimentalnom istraživanju bila je 35 m/s te je rubni uvjet ulazne brzine pri numeričkoj simulaciji postavljen identično, što rezultira Reynoldsovim brojem  $2,5 \cdot 10^6$ . Usporedba rezultata numeričke simulacije i eksperimenta dana je u nastavku.

### 6.10.1 Vodeći model - otpor



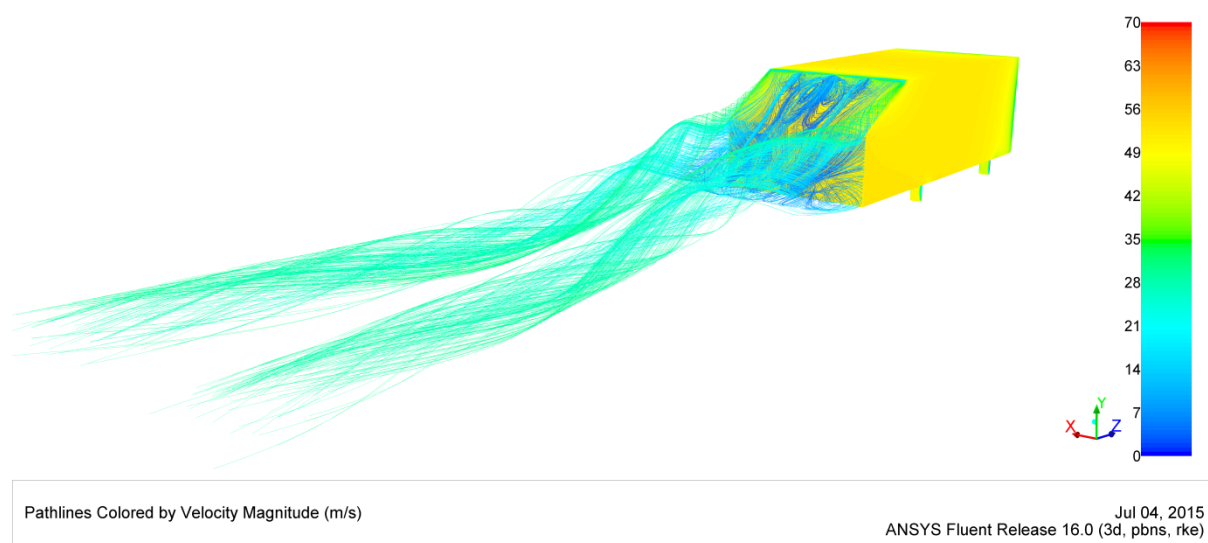
Slika 66. Ovisnost koeficijenta otpora vodećeg modela o međusobnom razmaku

Rezultati pokazuju da pri malom međusobnom razmaku modela ( $x/L < 0.5$  za eksperiment i  $x/L < 0.375$  za simulaciju) koeficijent otpora vodećeg modela može biti i više od 60% manji u odnosu na samostalni model (66,3% za simulaciju, 61,7% za eksperiment). Unutar područja  $0.25 < x/L < 2$ , sila otpora vodećeg modela ostaje značajno manja nego za slučaj samostalnog modela.

Glavni izvor aerodinamičkog otpora na Ahmedovom tijelu s kutom nagiba stražnje kosine  $30^\circ$  jest par pratećih rotirajućih vrtloga koji se odvajaju s C-stupova modela. Ovi vrtlozi sadrže znatne količine kinetičke energije te osjetno smanjuju tlak u pozadini vozila što doprinosi otporu oblika (tlaka). Pri malim međusobnim razmacima vozila, snaga ovih vrtloga s C-stupova vodećeg modela se smanjuje kako se kinetička energija vrtloga troši pri udarima u prateći model koji se nalazi u aerodinamičkom tragu što za posljedicu ima povećanje tlaka u stražnjem predjelu vodećeg modela te mu smanjuje koeficijent otpora oblika (tlaka). Kako se međusobni razmak vozila postupno povećava te prepreka vrtlozima koji se odvajaju s vodećeg modela nestaje, oni opet dobivaju na snazi

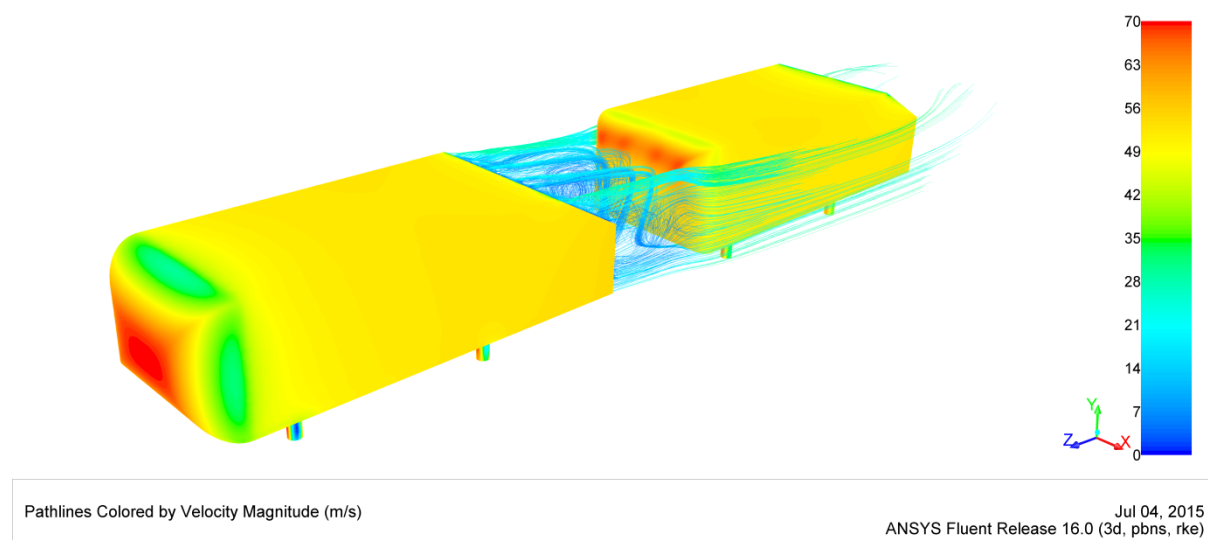


te dovode do snižavanja vrijednosti tlaka u stražnjem predjelu vodećeg modela te mu time povećavaju koeficijent aerodinamičkog otpora.

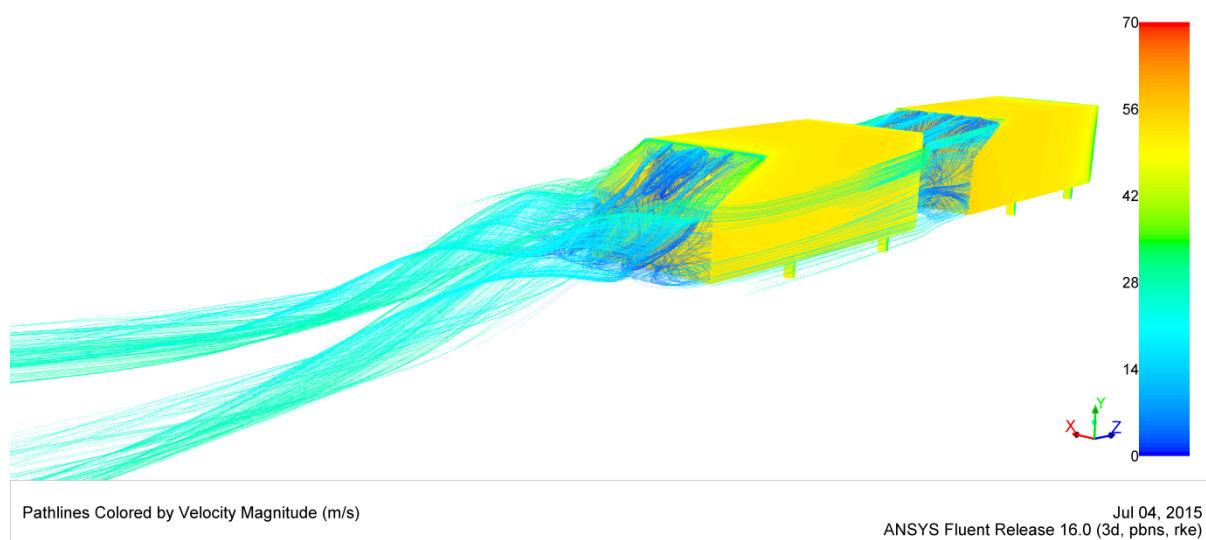


Slika 67. Strujanje u pozadini samostalnog Ahmedovog tijela

Slika 67. prikazuje neometan razvoj rotirajućih vrtloga sa stražnje kosine samostalnog Ahmedovog tijela. Strujnice na slici prikazuju raspodjelu brzine strujanja dok je na samom modelu prikazana raspodjela koeficijenta tlaka. Promotri li se istu situaciju u prisutnosti pratećeg modela na međusobnom razmaku  $x / L = 0.25$  (Slika 68. i Slika 69.), vidljivo je da rotirajući vrtlozi s C-stupova ne postoje.

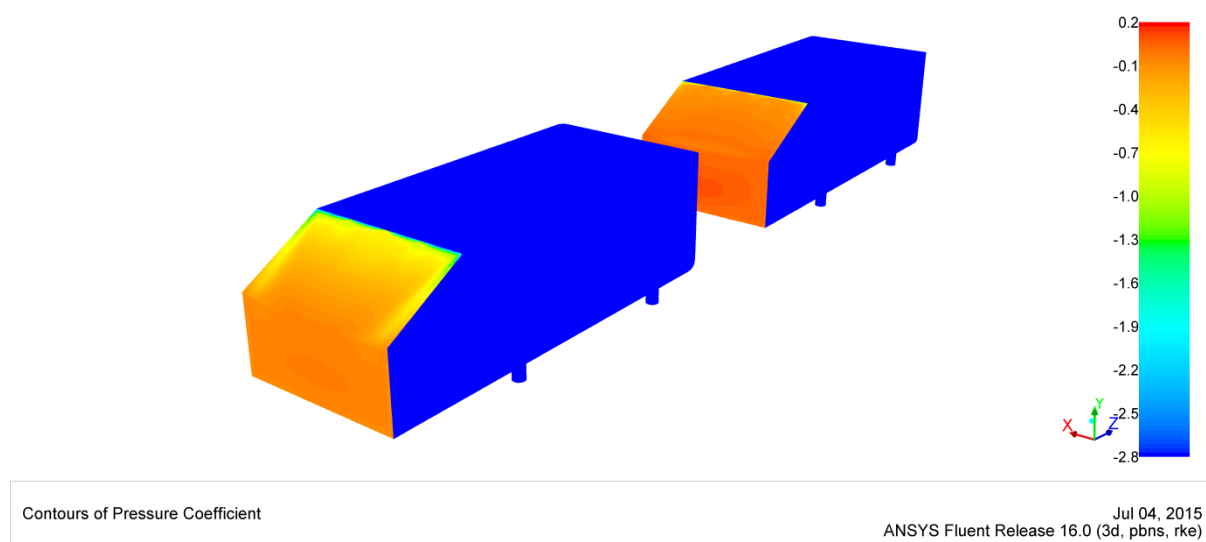


Slika 68. Pogled sprijeda na strujanje u pozadini vodećeg modela pri  $x / L = 0.25$



Slika 69. Pogled straga na strujanje u pozadini Ahmedovih tijela pri  $x / L = 0.25$

Također, na Slika 70. prikazana je raspodjela koeficijenta tlaka u lokalnom rasponu (mjerilo  $C_p$  na prikazanim površinama ograničeno je radi bolje akcentuacije razlika u porastu tlaka) iz koje je vidljiv porast tlaka na stražnjim površinama vodećeg tijela (posebno na kosini) uslijed manjka rotirajućih vrtloga s C-stupova pri malom međusobnom razmaku modela.



Slika 70. Raspodjela koeficijenta tlaka na stražnjim površinama modela pri  $x / L = 0.25$

Izvješće o koeficijentima sile otpora na stijenke modela izvezeno iz FLUENT-a (Tabela 12.) potvrđuje zaključke izvedene iz zapažanja o strujanju.

Tabela 12. Usporedno izvješće o koeficijentima otpora samostalnog i vodećeg modela pri  $x / L = 0.25$

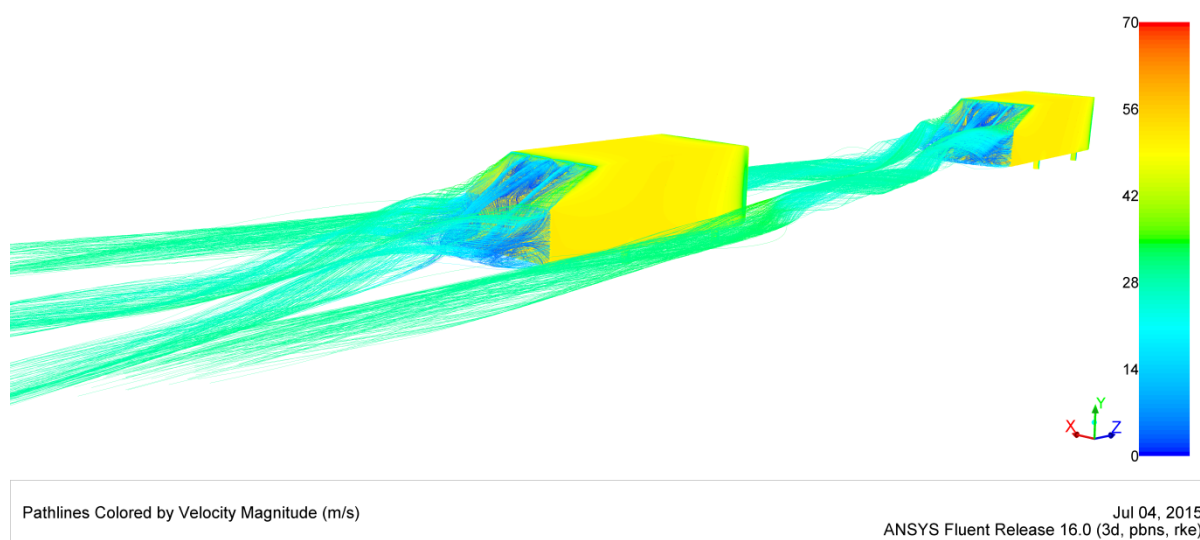
SAMOSTALNI MODEL

Forces - Direction Vector (0 0 -1)			
Coefficients			
Zone	Pressure	Viscous	Total
ahmed/cb	0.056845873	1.3761337e-14	0.056845873
ahmed/ck	0.028172441	0.0097624123	0.037934853
ahmed/cs	0.17551862	0.00078666317	0.17630528
ahmed/noge	0.013854766	0.001384526	0.015239292
ahmed/ravno	0	0.037445578	0.037445578
-----			
Net	0.2743917	0.04937918	0.32377088

VODEĆI MODEL  $x/L=0.25$

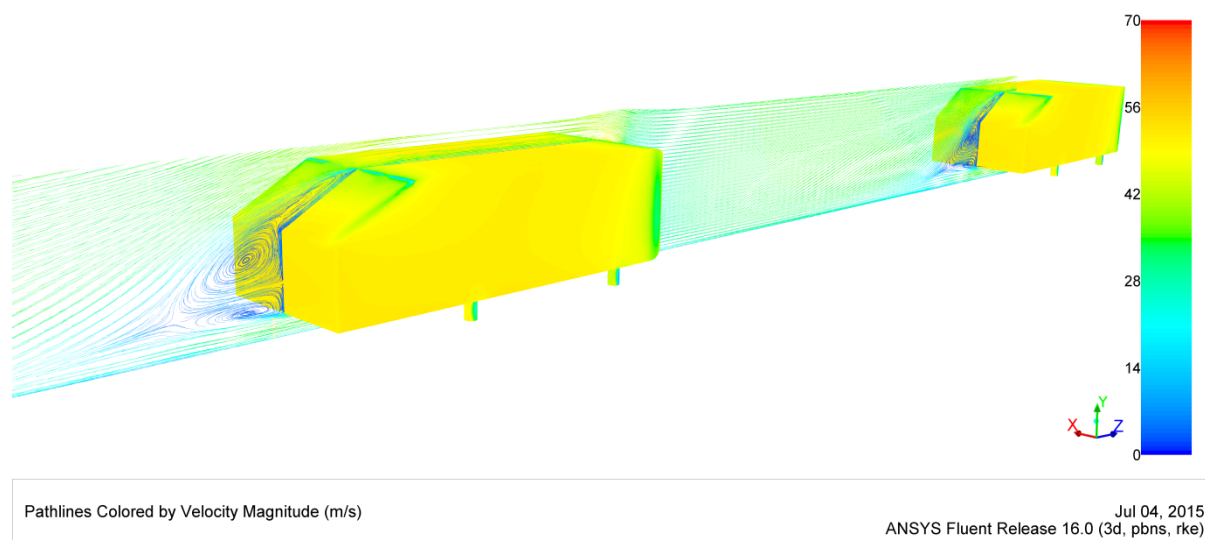
Forces - Direction Vector (0 0 -1)			
Coefficients			
Zone	Pressure	Viscous	Total
ahmed/cb	-0.026726125	4.6127181e-14	-0.026726125
ahmed/ck	0.045609294	0.0096797372	0.055289031
ahmed/cs	0.028351414	-0.00031396954	0.028037444
ahmed/noge	0.013326007	0.0013375365	0.014663544
ahmed/ravno	0	0.034436414	0.034436414
-----			
Net	0.060560589	0.045139718	0.10570031

Razmotri li se slučaj međusobnog razmaka  $x / L = 2$  za koji se vrijednost koeficijenta otpora vodećeg modela asimptotski približava vrijednosti za samostalni model, može se zaključiti da uklanjanjem prepreke vrtlozima s C-stupova vodećeg modela, istima se energija vraća te je strujanje u pozadini modela slično onome u pozadini samostalnog modela.



Slika 71. Strujanje u pozadini vodećeg modela pri  $x / L = 2$

Pogled na strujnice u ravnini simetrije na Slika 72. otkriva već poznatu strukturu strujanja prikazanu na Slika 59., dok izvješće u **Error! Reference source not found.** potvrđuje opažanja.



Slika 72. Strujanje u ravnini simetrije pri  $x / L = 2$

Tabela 13. Usporedno izvješće o koeficijentima otpora samostalnog i vodećeg modela pri  $x / L = 2$

**SAMOSTALNI MODEL**

Forces - Direction Vector (0 0 -1)			
Coefficients			
Zone	Pressure	Viscous	Total
ahmed/cb	0.056845873	1.3761337e-14	0.056845873
ahmed/ck	0.028172441	0.0097624123	0.037934853
ahmed/cs	0.17551862	0.00078666317	0.17630528
ahmed/noge	0.013854766	0.001384526	0.015239292
ahmed/ravno	0	0.037445578	0.037445578
Net	0.2743917	0.04937918	0.32377088

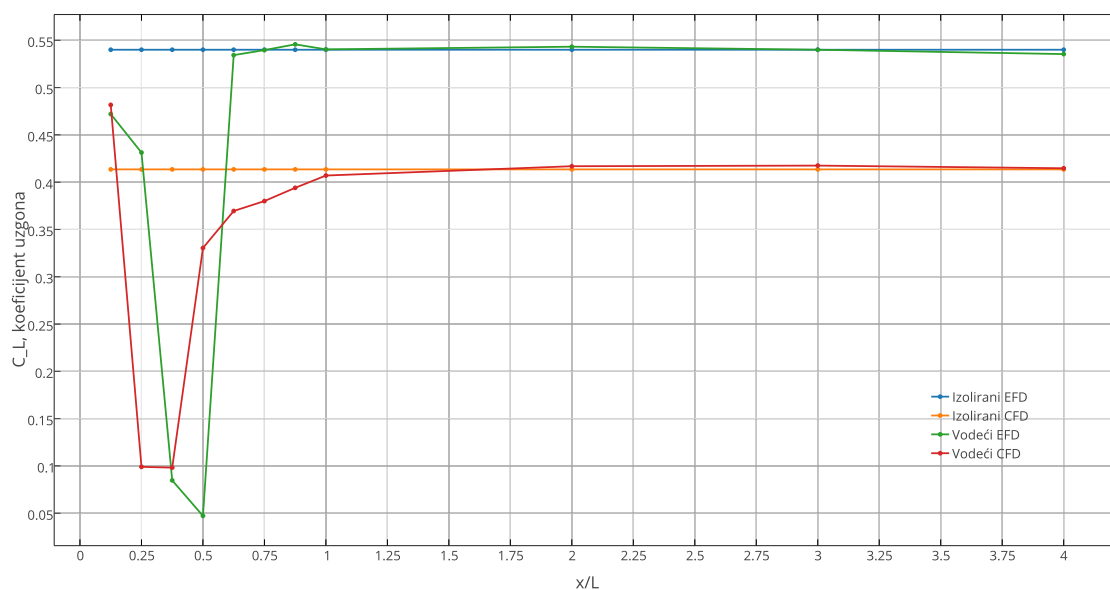
**VODEĆI MODEL  $x/L=2$**

Forces - Direction Vector (0 0 -1)			
Coefficients			
Zone	Pressure	Viscous	Total
ahmed/cb	0.046367129	1.4128969e-14	0.046367129
ahmed/ck	0.041849107	0.0097593489	0.051608455
ahmed/cs	0.17014097	0.00080987073	0.17095084
ahmed/noge	0.013831602	0.0013829288	0.015214531
ahmed/ravno	0	0.03740374	0.03740374
Net	0.27218881	0.049355888	0.32154469

### 6.10.2 Vodeći model - uzgon

Zavisnost koeficijenata uzgona vodećeg modela o međusobnom razmaku prikazuje Slika 73. Može se primijetiti da iako rezultati eksperimenta i numeričke simulacije odstupaju otprilike 23%, općeniti trendovi su obuhvaćeni te se poklapaju. Navedeno odstupanje

donekle se može pripisati izotropnosti  $k - \varepsilon$  modela koji pretpostavlja izotropnost turbulencije pri čemu su normalna naprezanja jednaka tj.  $\overline{u'^2} = \overline{v'^2} = \overline{w'^2}$  što pojednostavljuje modeliranje turbulentnih veličina, ali povećava netočnost u slučajevima gdje anizotropno ponašanje turbulentnih naprezanja dominira te se javlja mogućnost nad-predviđanja (engl. *over-prediction*) produkcije turbulencije.



**Slika 73.** Ovisnost koeficijenta uzgona vodećeg modela o međusobnom razmaku modela

Izvešće o raspodjeli koeficijenata uzgona za samostalni model, te za vodeći model pri međusobnim razmacima  $x / L = 0,25$  i  $x / L = 2$  izvezeno iz FLUENT-a prikazuje Tabela 14. Najveći doprinos sili uzgona čine zakrivljeni prednji kraj Ahmedovog tijela te njegova stražnja kosina (označeni žutom bojom). Analogno opažanju za koeficijent sile otpora, može se zaključiti da porast tlaka uslijed izostanka rotirajućih vrtloga s C-stupova vodećeg modela pri malom međusobnom razmaku ( $x / L = 0,25$ ) rezultira smanjenjem sile uzgona na stražnju kosinu tijela čiji koeficijent opada s vrijednosti 0,3 za samostalni model na samo 0,05 za vodeći model pri  $x / L = 0,25$ .

Raspodjela koeficijenata uzgona na prednjim i stražnjim osloncima modela (Slika 74.) dana je samo za numeričku simulaciju s obzirom da eksperimentalnih podataka prema [9] nije bilo.

Tabela 14. Usporedno izvješće o koef. otpora samostalnog i vodećeg modela pri  $x / L = 0.25$  i 2

SAMOSTALNI MODEL

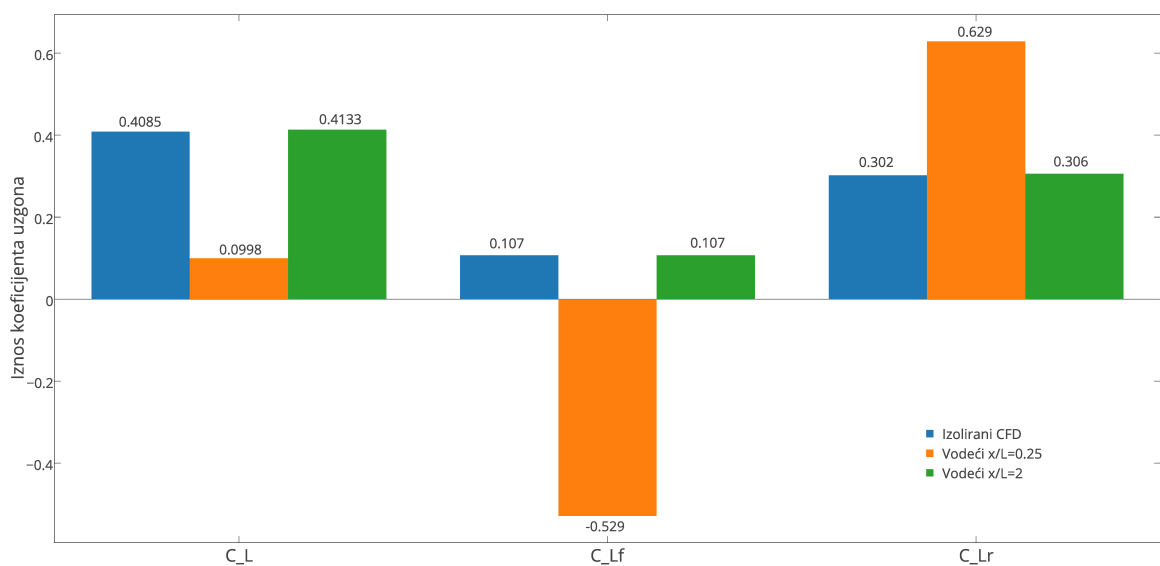
Forces - Direction Vector (0 1 0)			
Coefficients			
Zone	Pressure	Viscous	Total
ahmed/cb	-4.0957108e-12	4.9984709e-05	4.9984705e-05
ahmed/ck	0.11592224	0.00097559484	0.11689783
ahmed/cs	0.30400678	-0.00045418018	0.3035526
ahmed/noge	-6.9453097e-06	-5.0260011e-05	-5.720532e-05
ahmed/ravno	-0.012201279	0.00030279972	-0.011898479
Net	0.40772079	0.00082393908	0.40854473

VODEĆI MODEL  $x/L=0.25$

Forces - Direction Vector (0 1 0)			
Coefficients			
Zone	Pressure	Viscous	Total
ahmed/cb	-5.0626167e-13	5.8421411e-05	5.842141e-05
ahmed/ck	0.11687464	0.00098023965	0.11785488
ahmed/cs	0.049106063	0.00018127063	0.049287334
ahmed/noge	-6.0577553e-06	-4.8027619e-05	-5.4085374e-05
ahmed/ravno	-0.067383666	-1.4069982e-05	-0.067397736
Net	0.09859098	0.0011578341	0.099748814

VODEĆI MODEL  $x/L=2$

Forces - Direction Vector (0 1 0)			
Coefficients			
Zone	Pressure	Viscous	Total
ahmed/cb	-3.6637523e-12	5.5154275e-05	5.5154271e-05
ahmed/ck	0.11604793	0.00097623424	0.11702417
ahmed/cs	0.29469281	-0.00046757898	0.29422523
ahmed/noge	-6.8195336e-06	-5.0231648e-05	-5.7051182e-05
ahmed/ravno	0.0017649007	0.00031045345	0.0020753542
Net	0.41249882	0.00082403134	0.41332285

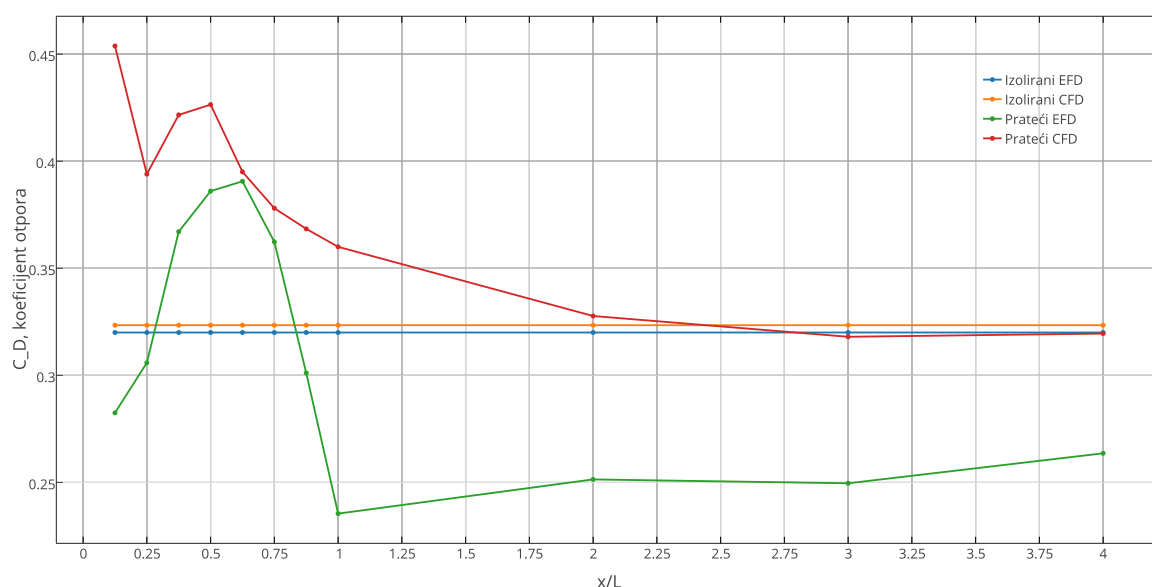


Slika 74. Raspodjela koeficijenta uzgona na prednji i stražnji oslonac tijela pri  $x / L = 0.25$  i 2

Iako ukupni koeficijent uzgona za vodeće Ahmedovo tijelo pri  $x / L = 0.25$  iznosi samo  $\sim 0.1$ , raspodjela na prednji i stražnji oslonac daje potpuno drugu sliku. Prisutnost pratećeg modela u aerodinamičkom tragu uzrokuje preraspodjelu uzgona u vrlo nepovoljnom smjeru i to na način da prednji dio tijela osjeća negativan uzgon (engl. *downforce*) dok stražnji dio tijela biva još više podignut od tla uslijed većeg iznosa pozitivnog uzgona. Kada bi analogijom ovakvu raspodjelu uzgona primijenili na vozilo, posljedica bi bila izrazita tendencija preupravljanju (engl. *oversteer*) tj. gubitku trakcije na stražnjoj osovini.

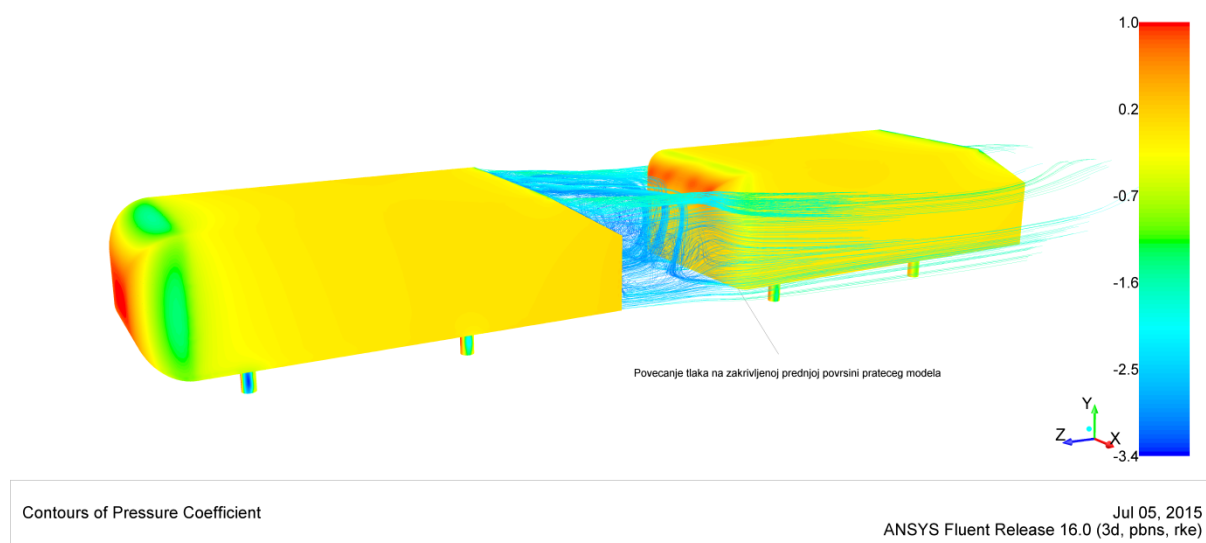
### 6.10.3 Prateći model - otpor

Pri malim međusobnim razmacima vozila ( $0.25 < x / L \leq 0.75$  za eksperiment i  $0.125 < x / L < 2$  za numeričku simulaciju), utjecaji razmaka na prateće vozilo bili su obrnuti od onih na vodeće vozilo (Slika 75.) pošto je koeficijent otpora zraka za prateće vozilo bio veći nego pri slučaju samostalnog Ahmedovog modela. Razlog povećanja koeficijenta otpora zraka pratećeg vozila pri malim međusobnim razmacima jest udaranje odvojenih vrtloga s vodećeg vozila u prednji dio pratećeg vozila što rezultira povećanjem tlaka na prednjoj površini modela.



Slika 75. Ovisnost koeficijenta otpora pratećeg modela o međusobnom razmaku

Interakciju strujanja vodećeg modela sa zakrivljenom prednjom površinom pratećeg modela prikazuje Slika 76.



Slika 76. Interakcija strujanja vodećeg modela s prednjim dijelom pratećeg modela pri  $x / L = 0.25$

Povećanje tlaka na prednjoj površini pratećeg modela (u odnosu na vodeći model, a i samostalni slučaj) dovodi do veće razlike tlakova između prednjeg i stražnjeg kraja modela, što je osnova otpora oblika tj. otpora tlaka (engl. *form drag*, *pressure drag*). Opažanje potvrđuje i izvješće o koeficijentima sile otpora za prateći model izvezeno iz FLUENT-a i prikazano u sljedećoj tabeli.

Tabela 15. Usporedno izvješće o koeficijentima otpora samostalnog i pratećeg modela pri  $x / L = 0.25$

#### SAMOSTALNI MODEL

Forces - Direction Vector (0 0 -1)			
Coefficients			
Zone	Pressure	Viscous	Total
ahmed/cb	0.056845873	1.3761337e-14	0.056845873
ahmed/ck	0.028172441	0.0097624123	0.037934853
ahmed/cs	0.17551862	0.00078666317	0.17630528
ahmed/noge	0.013854766	0.001384526	0.015239292
ahmed/ravno	0	0.037445578	0.037445578
Net	0.2743917	0.04937918	0.32377088

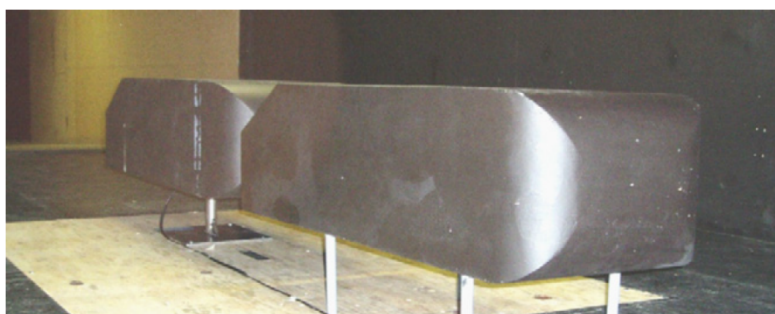
#### PRATEĆI MODEL $x/L=0.25$

Forces - Direction Vector (0 0 -1)			
Coefficients			
Zone	Pressure	Viscous	Total
ahmed2/cb	0.037272213	0	0.037272213
ahmed2/ck	0.14810521	0.0045902485	0.15269546
ahmed2/cs	0.16022962	0.00070316115	0.16093278
ahmed2/noge	0.011434168	0.00078041343	0.012214581
ahmed2/ravno	0	0.030555584	0.030555584
Net	0.35704121	0.036629407	0.39367062



Usporedbom koeficijenta otpora za zakrivljenu površinu  $c_K$  sa vrijednošću istog koeficijenta za vodeći model pri istom međusobnom razmaku (Tabela 12.), vidljivo je da  $c_K$  iznosi  $\sim 0.055$  dok vrijednost za izolirani model iznosi  $\sim 0.038$ . Skok u vrijednosti  $c_K$  pratećeg modela za  $\sim 300\%$  potvrđuje zaključke izvedene iz zapažanja o strujanju na tom dijelu modela i glavni je razlog povećanja sile otpora pratećeg modela pri malim međusobnim razmacima.

Iznenadjuća je činjenica da u rezultatima numeričke simulacije prateći model tek na međusobnoj udaljenosti  $x/L > 2$  osjeća vrlo malen pad sile otpora i to  $1,67\%$  pri  $x/L = 3$  te  $1,21\%$  pri  $x/L = 4$ , dok eksperiment pokazuje da na međusobnim razmacima  $x/L > 0.75$  prateći model osjeća pad sile otpora od  $\sim 22\%$ . Ovakvo odstupanje djelomično se opet može pripisati manjkavosti  $k - \varepsilon$  modela turbulencije, ali i manjkavom pristupu pri postavljanju eksperimenta na pratećem modelu. VINO et al. prema [9] navode kako je prateći model u RMIT University zračnom tunelu bio oslonjen samo u jednoj točki tj. na centralno smještenom potpornju što prikazuje Slika 77.



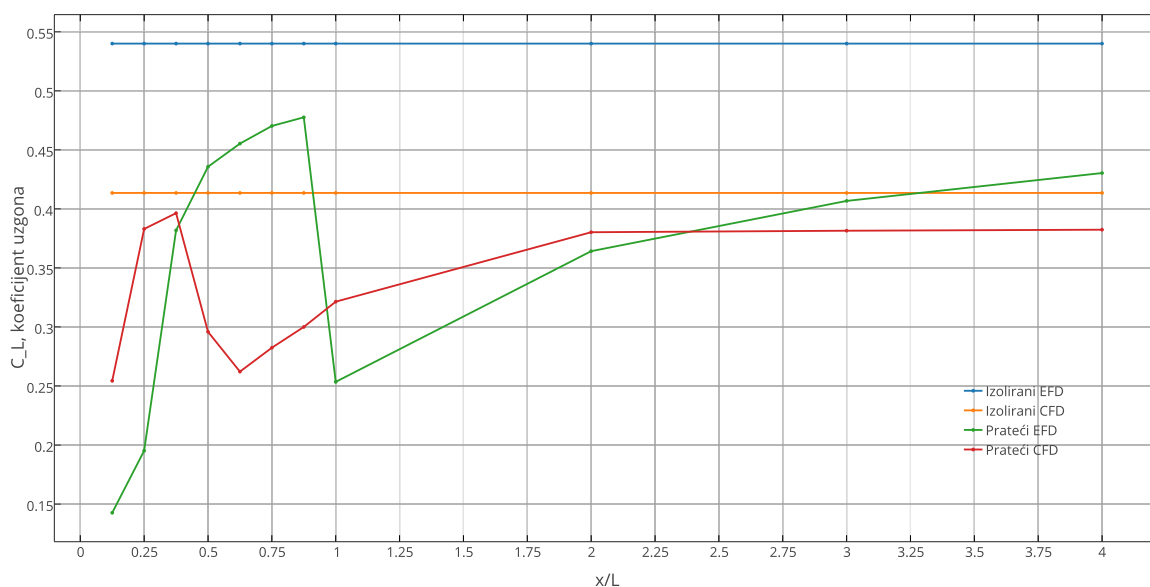
Slika 77. Eksperimentalni postav za ispitivanje draftinga u RMIT University zračnom tunelu

Sama priroda nestacionarnosti strujanja u pozadini modela, a i utjecaji vodećeg modela koji se nalazio u konfiguraciji eksperimenta, doveli su do toga da je cijeli prateći model za vrijeme ispitivanja vidno oscilirao oko lateralne osi tj. ponirao naprijed/nazad čime je sam model utjecao na mjerenje sila i povećavao turbulentnost strujanja. Ova činjenica dovodi u pitanje vjerodostojnost rezultata eksperimenta za prateće tijelo, posebno ako se uoči da se rezultati numeričke simulacije (otpora i uzgona) izvrsno poklapaju s

eksperimentalnima za vodeći i samostalni model, dok se usporedbom rezultata za prateći model vidi poklapanje određenih trendova ali su razlike u iznosima istih velike.

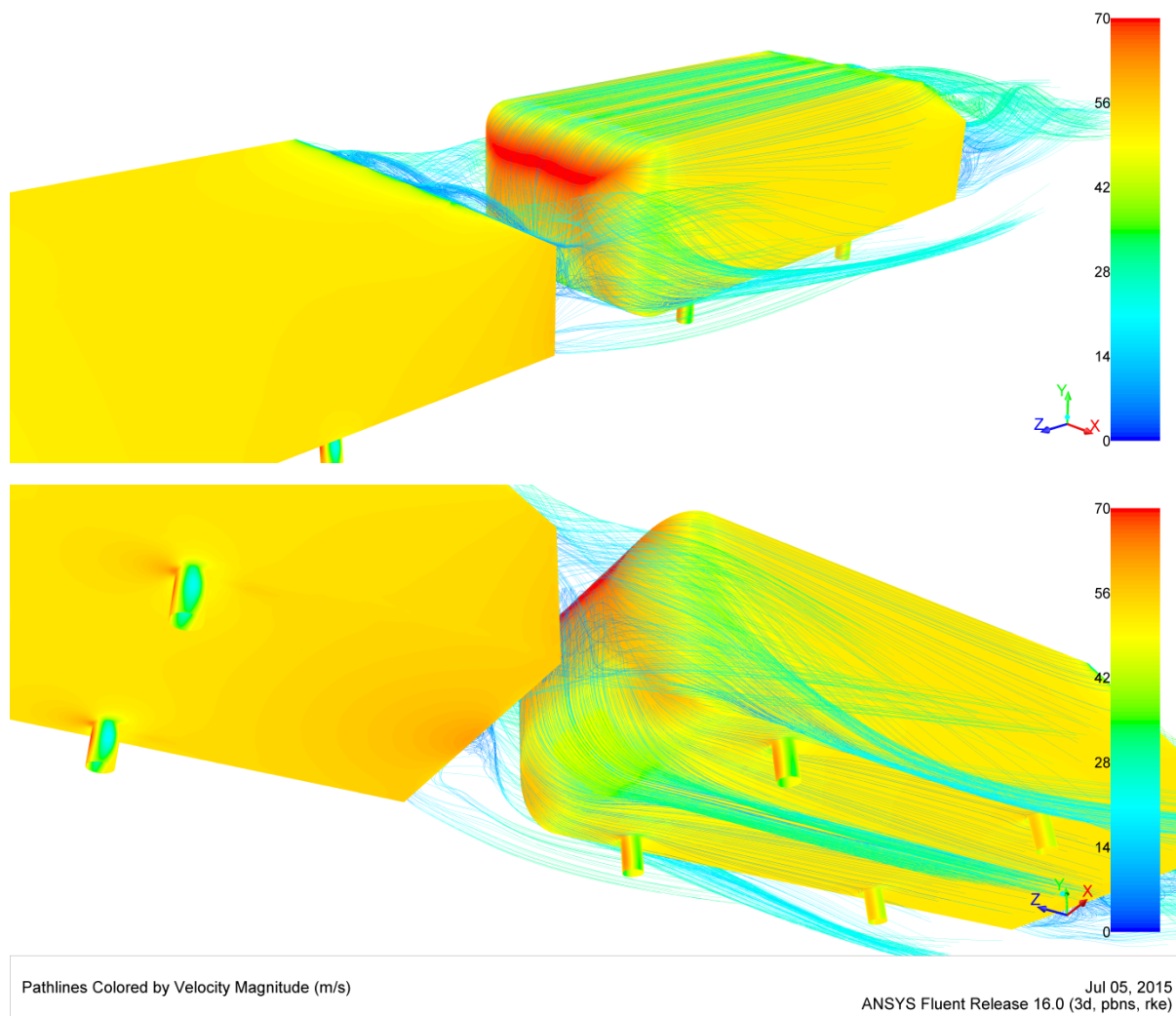
#### 6.10.4 Prateći model - uzgon

Utjecaj međusobnog razmaka modela na koeficijent uzgona pratećeg modela prikazan je Slika 78. Vrijednosti rezultata eksperimenta i numeričke simulacije opet odstupaju ali može se primijetiti podudaranje trendova. Pri eksperimentalnom istraživanju koeficijent uzgona pratećeg modela nikada nije dosegao vrijednost za slučaj samostalnog modela unutar raspona međusobnih razmaka  $0.125 \leq x/L \leq 4$ , ali je za međusobne razmake  $x/L > 1$  počeo rasti i asimptotski se približavati vrijednosti za samostalni model. Sličan trend vidljiv je i u rezultatima numeričke simulacije ali već od međusobnog razmaka  $x/L > 0.5$ . Oba skupa rezultata ukazuju na inicijalno povećane koeficijenta uzgona pri malim međusobnim razmacima modela te naknadni pad istih (pri  $x/L > 0.875$  za eksperiment i  $x/L = 0.375$  za numeričku simulaciju).



Slika 78. Ovisnost koeficijenta uzgona pratećeg modela o međusobnom razmaku

U nastavku će biti razmotren slučaj međusobnog razmaka  $x/L = 0.125$  za koji koeficijent uzgona pratećeg modela ima svoj minimum (i eksperimentalno i pri numeričkoj simulaciji).



Slika 79. Interakcija strujanja vodećeg modela s prednjim dijelom pratećeg modela pri  $x/L = 0.125$

Slika 79. prikazuje strujanje u području između dvaju modela na najmanjem međusobnom razmaku. Može se uočiti da je točka stagnacije strujanja na pratećem modelu pomaknuta na sam vrh zakrivljene prednje površine te da se strujanje od tamo dijeli u dva smjera, prema gornjim površinama modela i prema području podnice. Ubrzanjem strujanja na donjem dijelu zakrivljene prednje površine dolazi do lokalnog pada tlaka što možemo vidjeti iz žuto-zelene boje u tom području, što za rezultat ima

smanjenje uzgona na tom dijelu modela. Opažanje potvrđuje i izvješće o koeficijentima sile uzgona izvezeno iz FLUENT-a i prikazano sljedećom tabelom.

Tabela 16. Usporedno izvješće o koef. uzgona samostalnog i pratećeg modela pri  $x / L = 0.125$

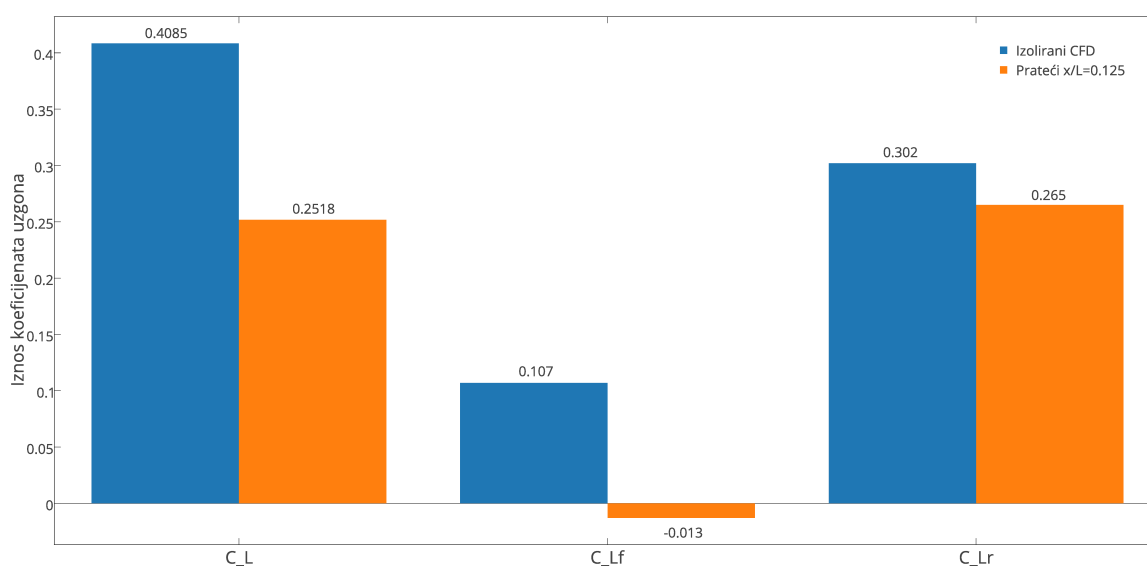
IZOLIRANI MODEL

Forces - Direction Vector (0 1 0)			
Coefficients			
Zone	Pressure	Viscous	Total
ahmed/cb	-4.0957108e-12	4.9984709e-05	4.9984705e-05
ahmed/ck	0.11592224	0.00097559484	0.11689783
ahmed/cs	0.30400678	-0.00045418018	0.3035526
ahmed/noge	-6.9453097e-06	-5.0260011e-05	-5.720532e-05
ahmed/ravno	-0.012201279	0.00030279972	-0.011898479
-----			
Net	0.40772079	0.00082393908	0.40854473

PRATEĆI MODEL  $x/L=0.125$

Forces - Direction Vector (0 1 0)			
Coefficients			
Zone	Pressure	Viscous	Total
ahmed2/cb	0	7.8035641e-05	7.8035641e-05
ahmed2/ck	-0.106019	-0.0037763007	-0.1097953
ahmed2/cs	0.30601788	-0.00053432477	0.30548356
ahmed2/noge	-1.1723482e-06	2.6618733e-05	2.5446385e-05
ahmed2/ravno	0.059626016	-0.003613028	0.056012988
-----			
Net	0.25962372	-0.0078189992	0.25180473

Iz sljedeće slike možemo vidjeti da prateće tijelo za slučaj međusobnog razmaka  $x / L = 0.125$  ima povoljniju raspodjelu uzgona na prednji i stražnji oslonac nego što je to bilo za slučaj vodećeg modela pri razmaku  $x / L = 0.25$  tj. oba kraja vozila doživljavaju smanjenje uzgona (prednji kraj za -0,037, stražnji -0,094).

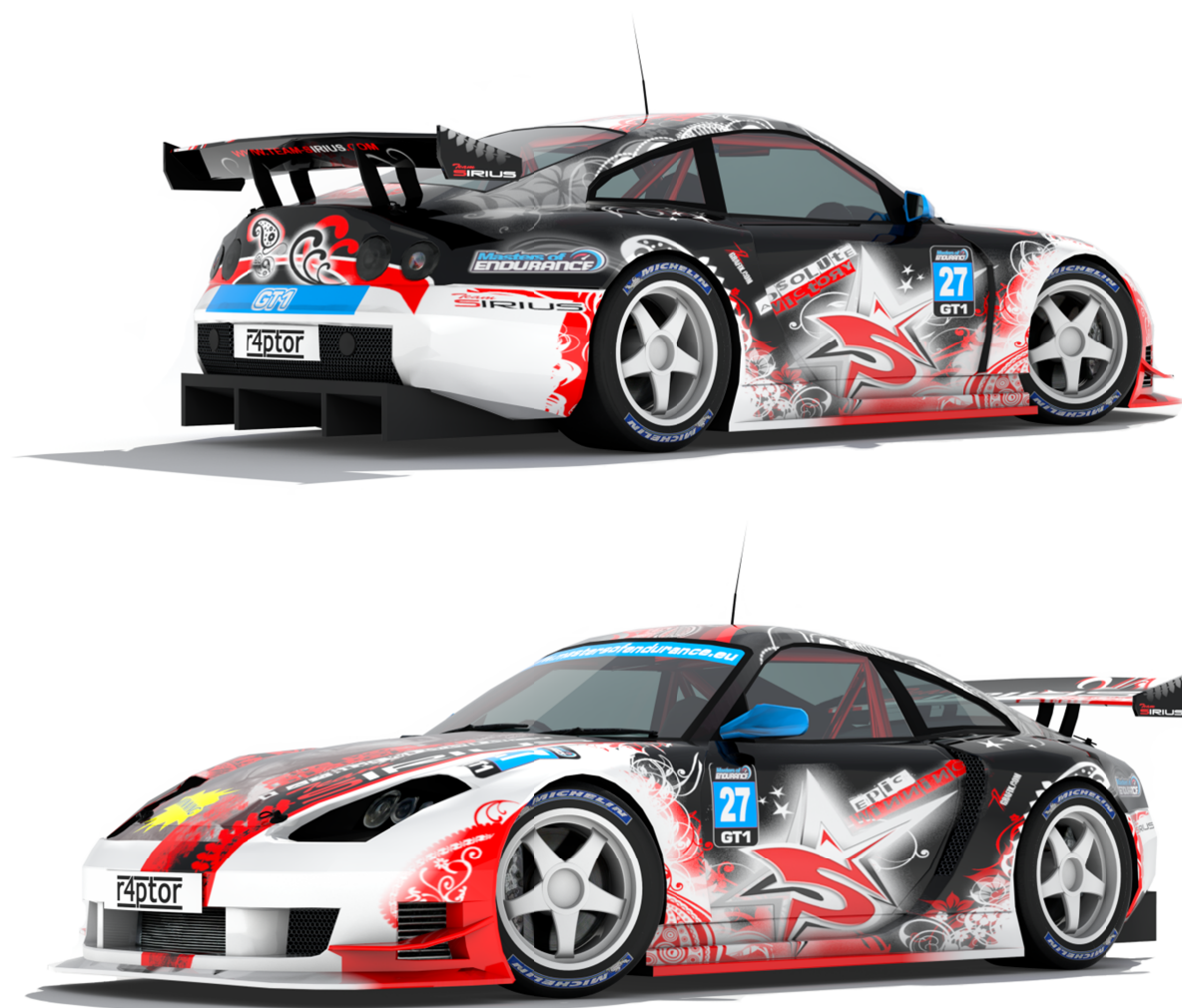


Slika 80. Raspodjela koeficijenta uzgona na prednji i stražnji oslonac tijela pri  $x / L = 0.125$

## 7 Numerička simulacija opstrujavanja GT vozila

### 7.1 Uvod u problematiku simulacije

Simulacija je provedena za model vozila FZ50 GTR (FZR) iz računalne simulacije vožnje LiveForSpeed<sup>10</sup> (LFS), koji spada u GT klasu natjecateljskih automobila, a prikazan je na sljedećoj slici.



---

<sup>10</sup> LiveForSpeed je mrežna simulacija trkaće vožnje razvijena u Velikoj Britaniji od strane tročlanog tima. Cilj simulacije je da pruži vozačima realistično natjecateljsko iskustvo u mrežnoj igri, uz jedan od najnaprednijih modela dinamike vozila. ([www.lfs.net](http://www.lfs.net))

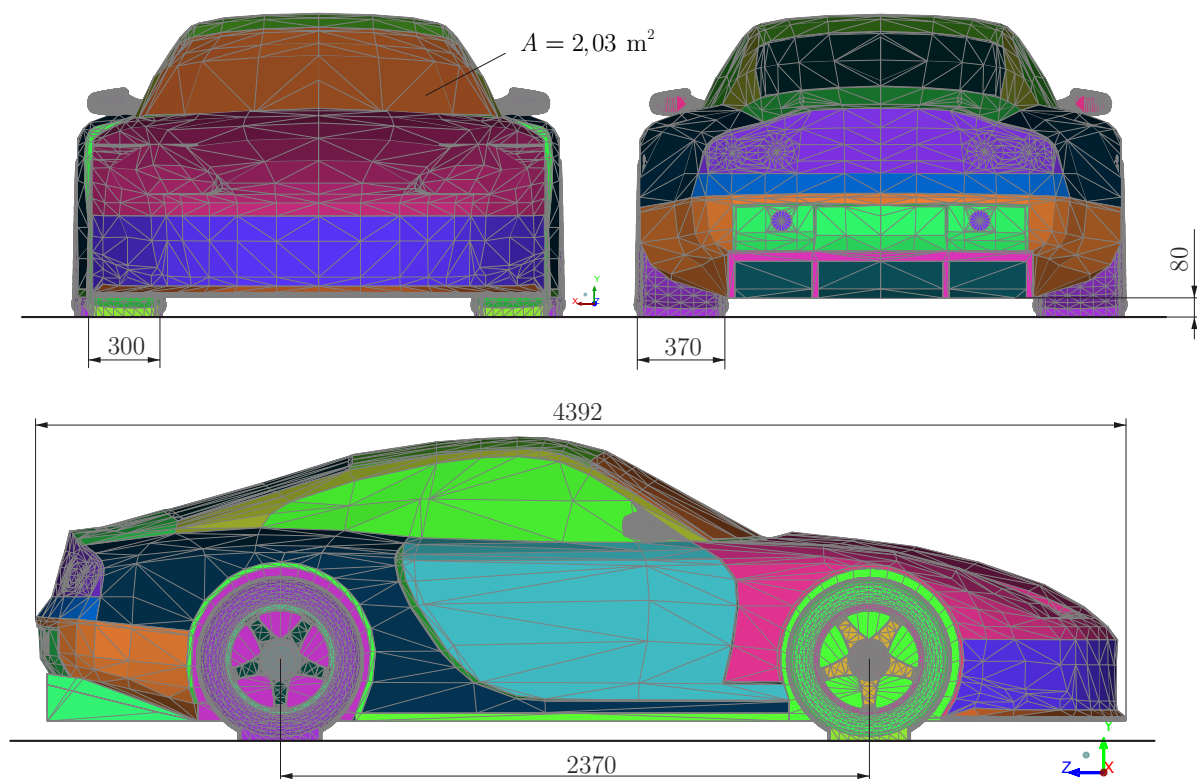
Cilj numeričke simulacije strujanja jest pronaći zavisnost koeficijenata sile otpora i uzgona te njihovu raspodjelu u ovisnosti o međusobnom razmaku vozila te kasnija implementacija pronađenih rezultata u program simulacije vožnje. Trenutni, pojednostavljeni model aerodinamike u LFS-u pretpostavlja konstantnu i jednaku vrijednost koeficijenata otpora i uzgona za sva tri automobila GT klase iako su oni vrlo različitih oblika i konfiguracija, te ovi koeficijenti nikako ne ovise o dinamičkoj prirodi same vožnje. Također, trenutni model *draftinga* predviđa osjetne gubitke sile otpora pratećeg modela čak i na udaljenostima većima od  $10L$ , dok vodeći model ne osjeća nikakvu promjenu u sili otpora. Još veći problem jest taj što model aerodinamike predviđa velike gubitke negativnog uzgona na relativno jednostavnom prednjem kraju GT automobila koji bi trebao biti znatno manje osjetljiv od npr. jednosjeda s aeroprofilom na mjestu prednjeg krila.

Priroda ovoga rada je *komparativna* – iako unesena geometrijska pojednostavljena za sobom povlače odstupanje pronađenih vrijednosti od onih stvarnih, odstupanja će biti jednaka i prisutna u svakom od testiranih slučajeva što će rezultate čini usporedivima. Prije implementacije pronađenih vrijednosti i zavisnosti u samu simulaciju vožnje, na sve rezultate biti će primijenjeni korekcijski faktori kojima će se oni približiti realnim vrijednostima pronađenima u literaturi za vozila istog tipa i slične konfiguracije. Prvi problem pri simulaciji opstrujavanja na tzv. *game model* geometriji jest niska kvaliteta početne geometrije. Za svrhe računalne grafike, modeli se sastoje od poligona te su optimizirani za što bolje grafičke performanse, što znači relativno nizak broj poligona te određenu "grbavost" geometrije koja se potom umjetno uglašava za kvalitetniji prikaz na zaslonu. Ovakva geometrija na mjestima oštih rubova pri simulaciji opstrujavanja može uzrokovati odvajanje strujanja koje inače ne bi bilo prisutno te su i iz tog razloga uvedene određene izmjene.

Nadalje, na mjestima koja u simulaciji vožnje nisu vidljiva, poput unutrašnjosti blatobrana kotača dolazi do prodiranja geometrije kotača kroz geometriju tijela vozila.



Iako ova pojava ne smeta samoj računalnoj simulaciji vožnje koja radi s vrijednostima u točkama, a samo kretanje vozila je animirano, u simulaciji opstrujavanja fluida ovakvi geometrijski nedostaci znače mjesta pojave velikih problema pri izradi diskretizacijske mreže i same simulacije strujanja. Iz navedenih razloga, uvedena su određena pojednostavljenja i izmjene geometrije vozila u svrhu omogućavanja kvalitetnije računalne simulacije strujanja. Međutim, komparativna priroda pristupa simulaciji ovom, a i budućim modelima, nalaže da originalne geometrije moraju ostati što je više moguće netaknute, što znači da geometrijske karakteristike vozila nisu na niti jedan način optimizirane u svrhu poboljšanja koeficijenata otpora i uzgona.



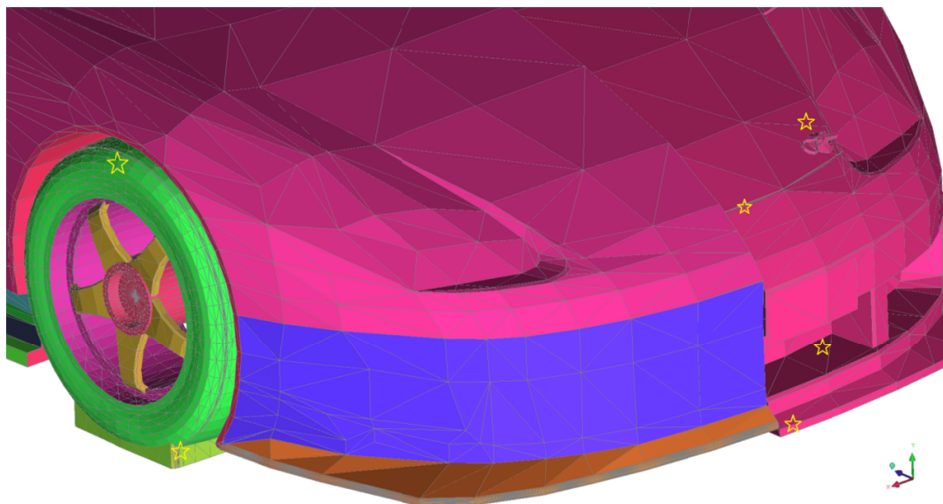
Slika 81. Nacrtni i bokocrti pogled FZR modela vozila s relevantnim dimenzijama

Slika 81. prikazuje dimenzije modela koje su bile od interesa za simulaciju opstrujavanja modela. Od prethodno spomenutih pojednostavljenja geometrije u nastavku će biti iznesena ona najvažnija.

## 7.2 Pojednostavljenja geometrije FZR modela

Većina automobilskih geometrija na kojima se danas vrši numerička simulacija opstrujavanja vrlo su blizu konačnom proizvodnom obliku vozila, tj. vrlo su detaljna u svim područjima. Tijekom numeričke analize uvode se određena pojednostavljenja koja ovise o ciljevima simulacije. U većini ispitivanja u zračnim tunelima ne uzima se u obzir strujanje kroz samo vozilo (u prostoru ispod poklopca motora i/ili u prostoru za putnike), te se otvori za zrak u ove prostore blokiraju trakama – samim time ovakva pojednostavljenja mogu se uvesti i u numeričku simulaciju strujanja.

Dobar dio ukupne sile otpora pri gibanju natjecateljskih automobila otpada na otpor unutarnjeg strujanja kroz motor i hladnjake, posebno ako se uzme u obzir da su baš kod natjecateljskih automobila ove komponente većih dimenzija nego njihovi ekvivalenti u cestovnim automobilima. U ovom radu zbog ograničenih računalnih resursa i vremena potrebnog za dovođenje geometrije u stanje spremnosti za takvu simulaciju, ovakvo strujanje nije uzeto u obzir te su otvori na prednjem odbojniku zatvoreni (Slika 82).



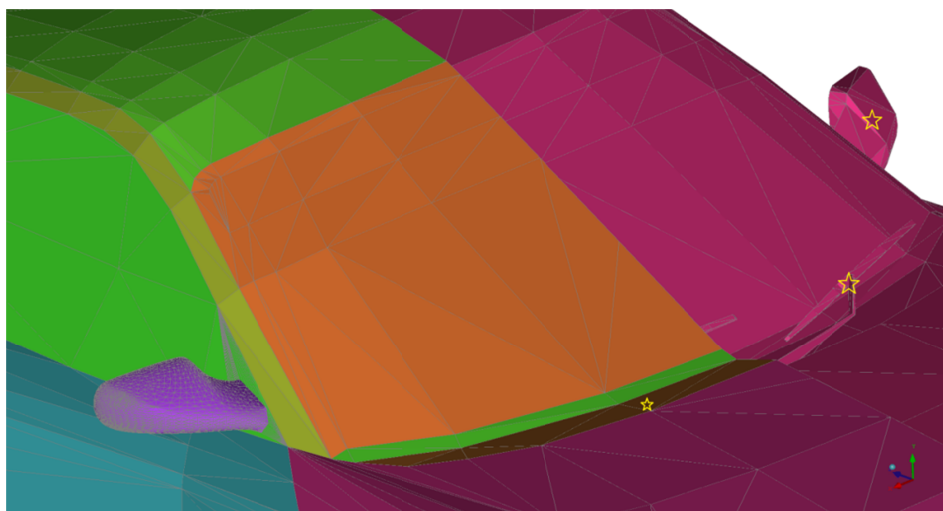
Slika 82. Pojednostavljenja geometrije prednjeg dijela modela

Prijelazi poput onog između prednjeg odbojnika i poklopca karoserije su izgladeni, zaobljen je prijelazni brid prednjeg razdjelnika i podnice te je povećana kružnost kotača (kružnica je aproksimirana većim brojem poligona u odnosu na izvornu geometriju). U područje dodira kotača i tla dodan je materijal u obliku "klina" da bi se izbjegao vrlo oštar kut koji se inače nalazi na tom mjestu i uzrokuje iznimno nekvalitetne konačne



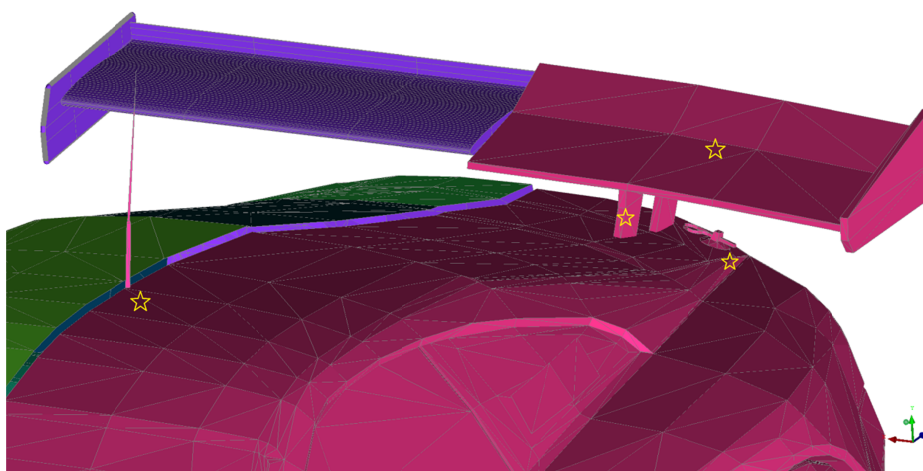
elemente u graničnom sloju. Podignuta je i visina oslanjanja modela s izvornih 59 mm na 80 mm u svrhu povećanja razmaka između površine kotača i blatobrana zbog izbjegavanja sudara pri rastu prizmatskih elemenata s obaju površina.

Brisači prednjeg vjetrobranskog stakla potpuno su uklonjeni s modela dok je prijelaz između prednjeg poklopca karoserije i vjetrobranskog stakla pojednostavljen i poravnat (Slika 83). Originalni retrovizor vrlo niskog broja poligona i oštih rubova zamijenjen je s NURBS modelom napravljenim u CAD paketu SolidWorks.



Slika 83. Pojednostavljena geometrije srednjeg dijela modela

Sa stražnjeg dijela modela uklonjeni su detalji poput osigurača poklopca motora, krovna antena i nosači krila (Slika 84). Više o stražnjem krilu koje je zamijenjeno NURBS modelom aeroprofila, biti će rečeno u poglavlju 7.3.



Slika 84. Pojednostavljena geometrije stražnjeg dijela modela

### 7.3 Krilo

Primarna svrha korištenja aerodinamičkih pomagala kod natjecateljskih vozila jest povećanje vertikalnih sila na kotače. Povećanje vertikalne sile na kotač dovodi do povećanja sile adhezije gume s tлом što omogućuje poboljšanje lateralnih i longitudinalnih dinamičkih sposobnosti vozila s kvadratom brzine vožnje.

Krilo natjecateljskog vozila uvelike funkcionira na sličan način kao i krilo letjelice – uz nekoliko važnih razlika:

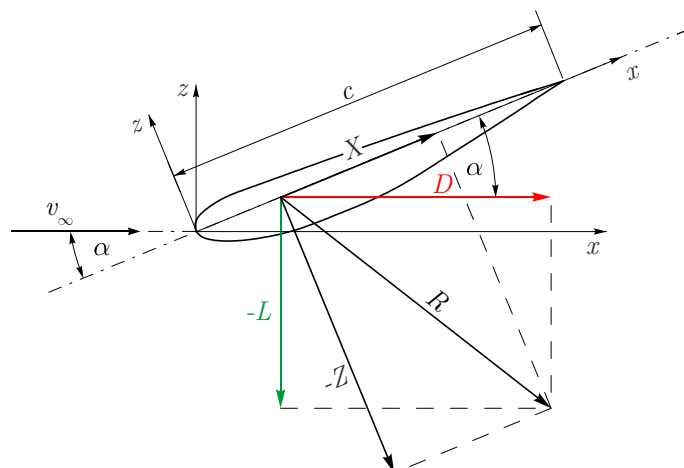
- krilo je montirano naopako s ciljem dobivanja negativnog uzgona (engl. *downforce*),
- krilo mora djelovati u blizini tla i u strujanju koje je u određenoj mjeri uznemireno gibanjem vozila,
- pravila natjecateljskih serija u većini slučajeva zabranjuju promjenu napadnog kuta krila.

Ravna ploča pod određenim napadnim kutom proizvoditi će negativan uzgon, ali i znatan otpor. Stoga se pri izradi krila koriste aeroprofil koji omogućavaju postizanje visokih vrijednosti sile negativnog uzgona sa što manjim iznosom sile otpora. Oblik aeroprofila diktira prirodu strujanja te se zrak preko donje, zakrivljenije strane aeroprofila, giba brže nego preko gornje strane. Bernoulijeva jednadžba govori da će se pri ubrzanom gibanju duž donje površine javiti snižena vrijednost tlaka u usporedbi s gornjom površinom te će resultantna sila djelovati prema dolje tj. aeroprofil će proizvoditi negativan uzgon. U aerodinamici aeroprofila koriste se dva koordinatna sustava. Oba imaju ishodište na početku tetive<sup>11</sup> a razlikuju se prema smjeru  $x$  osi tj. jedan ima  $x$  os u pravcu tetiva dok je  $z$  os okomita na nju, dok drugi ima  $x$  os u smjeru neporemećene brzine strujanja  $v_\infty$ . U koordinatnom sustavu vezanom za tetivu aerodinamička sila u smjeru tetive naziva se uzdužna sila i nosi oznaku  $X$ , dok se

---

<sup>11</sup> Tetivom aeroprofila naziva se linija koja spaja njegov napadni i izlazni rub.

komponenta okomita na nju naziva normalna sila i nosi oznaku  $Z$ . Komponente sila u koordinatnom sustavu vezanom za smjer neporemećenog strujanja nazivaju se otpor  $D$  sa smjerom duž neporemećene brzine strujanja, te uzgon  $L$  sa smjerom okomitim na neporemećenu brzinu strujanja. Napadni kut  $\alpha$  definiran je kao kut između tetive aeroprofila i smjera neporemećenog strujanja  $v_\infty$ .



Slika 85. Koordinatni sustavi i sile aeroprofila za negativni uzgon

Potrebno je smjer strujanja na krilo neće biti paralelan s tlom već će se lokalno mijenjati ovisno o blizini drugih površina vozila i turbulencije koja je prethodno unesena u strujanje. Iz ovog razloga zbog jednostavnosti, kada se izrazi napadni kut  $\alpha$  odabran za simulaciju, misli se na kut između tetive krila i horizontalne osi tj. tla ili neporemećenog strujanja dovoljno daleko od vozila.

### 7.3.1 NASA LS(1)-0413 aeroprofil

NASA LS(1)-0413 aeroprofil odabran je na temelju zaključaka istraživanja o dizajnu stražnjeg krila za GT sportske automobile iznesenih u [25]. U istraživanju autori su uspoređivali aeroprofile prirodnog laminarnog strujanja i njihovu uporabu u natjecanjima GT automobila. Izvedena je numerička analiza korištenjem teorije tankih aeroprofila i metode konačnog krila te su uspoređeni aeroprofil NACA 65-412 te NASA

LS(1)-0413 uz nekoliko konfiguracija vitkosti<sup>12</sup> krila (engl. *aspect ratio*), vrhova krila ili terminezona (engl. *end plate*) te Gurney zakrilca (engl. *Gurney flap*). Zaključak istraživanja bio je da je NACA 65-412 aeroprofil efikasniji koji proizvodi manje negativnog uzgona te je pogodan za upotrebu kao stabilizator, dok je NASA LS(1)-0413 aeroprofil otporniji na slom uzgona, proizvodi više negativnog uzgona po cijeni malo većeg otpora te je u kombinaciji s Gurney zakrilcem privlačan izbor za krila GT automobila koja se sastoje od jednog elementa.

### 7.3.2 FIA "Le Mans" Grand Tourisme Endurance 2015.

Krilo za FZR model izrađeno je u skladu s FIA LM GTE tehničkim pravilnikom za GT automobile koji kaže sljedeće:

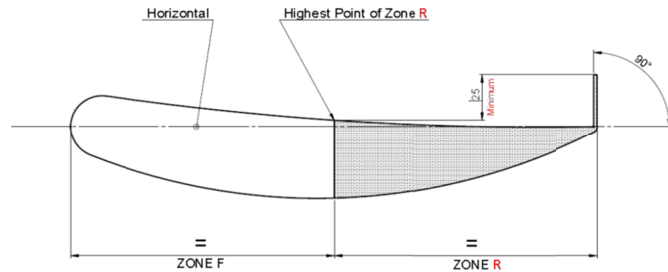
"Dozvoljeno je korištenje krila povrh šasijske napravljene iz jednog elementa pod uvjetom da ono:

- Zamjenjuje originalno krilo ako je ono montirano na automobilu;
- Stane, uključujući terminezone i mehanizam za podešavanje napadnog kuta, u volumen dimenzija 45 cm (horizontalno) x 15 cm (vertikalno) x 91% maksimalne širine homologiranog vozila (prema ACO homologacijskom obrascu);
- Nema duljinu tetive veću od 30 cm;
- Je montirano 10 cm niže od najviše točke krova vozila;
- Obavezno ima kruto Gurney zakrilce visoko minimalno 25 mm iznad najviše točke na stražnjoj polovini krila ( $0,5 \leq c \leq 1$ ). Za ovu mjeru ravnina u kojoj leži tetiva mora biti horizontalna. Zakrilce mora biti okomito na tetivu aeroprofila i zrak ne smije prolaziti između zakrilca i gornje površine aeroprofila.

---

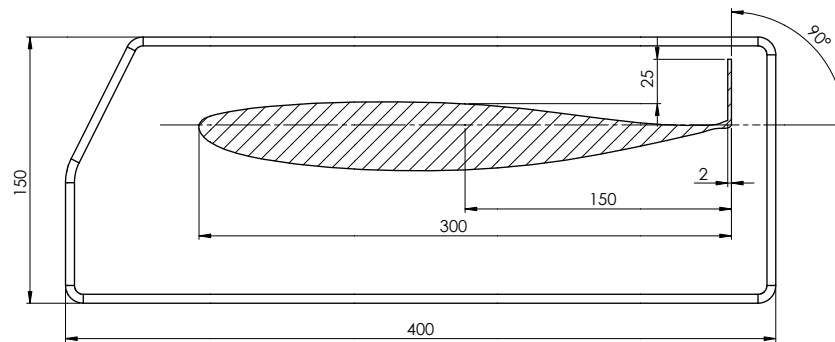
<sup>12</sup> Vitkost krila je omjer raspona krila i duljine tetive. S porastom vitkosti raste efikasnost krila.

- Ima terminezone koji leže u vertikalnoj ravnini i plosnati su, s minimalnom debljinom 10 mm te konstantnim radijusom zakrivljenosti rubova terminezona 5 mm."



Slika 86. FIA pravilo vezano za Gurney zakrilce

Uz navedena ograničenja konstruirano je krilo iz NASA LS(1)-0413 aeroprofila s tetivom duljine 300 mm prema sljedećoj slici.



Slika 87. Krilo za FZR model prema FIA tehničkom pravilniku

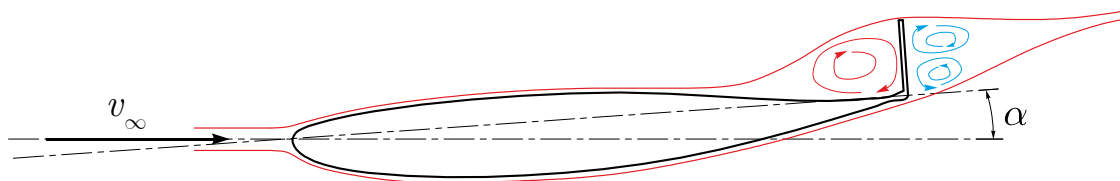
Pozicija aeroprofila unutar terminezona određena je preporukama iz literature [12] [25] gdje se navodi da s obzirom na činjenicu da gornja površina krila nije toliko kritična, dio terminezona iznad aeroprofila može biti znatno manji nego donji dio, koji bi trebao iznositi barem dvije debljine aeroprofila. Sam oblik terminezona preuzet je iz opažanja istog na Porsche 911 GT3 RSR natjecateljskom vozilu GT klase.

Maksimalna širina FZR modela vozila iznosi 1940 mm što znači da je maksimalna dopuštena širina krila (uključujući terminezone) 91% te mjere, stoga ukupna širina krila ograničena na 1765 mm što je 0,4 mm ispod maksimalne dopuštene. Krilu je zadan napadni kut  $\alpha$  od 4° (u odnosu na tlo) prema [25] gdje autori navode da iako je LS(1)-0413 krilo najefikasnije pri napadnom kutu  $\alpha = 2^\circ$  gdje mu  $-C_L$  iznosi 0.46,

postavljanjem napadnog kuta na  $4^\circ$   $-C_L$  raste na 0.62 uz minimalan prirast otpora. Ugradbena visina (1000 mm od ravnine tla) i položaj (1800 mm straga od središta međuosovinskog razmak) krila nisu promijenjeni u odnosu na izvorni model.

### 7.3.3 Gurney zakrilce

Gurney zakrilce (engl. *Gurney flap*) jednostavna je aerodinamička naprava (spojler) čijom se montažom na izlazni rub krila mogu postići veći maksimalni negativni koeficijent uzgona  $-C_{L,max}$ , smanjenje napadnog kuta nultog uzgona i povećanje momenta poniranja  $C_M$  tipično za povećanje zakrivljenosti (engl. *camber*) aeroprofila. Pri malim napadnim kutovima moguće je povećanje koeficijenta otpora  $C_D$ , dok su za deblje aeroprofile moguća i smanjenja sile otpora. Djelovanje zakrilca je dvojako: na gornjoj površini (visokog tlaka) barijera koju predstavlja zakrilce lokalno povećava tlak te time doprinosi negativnom uzgonu krila, dok par protusmjerno rotirajućih vrtloga iza zakrilca koji se odvajaju u von Karmanov vrtložni trag doprinose smanjenju tlaka na donjoj površini krila (područje niskog tlaka) te negativnom uzgonu. Također, vezani vrtlozi ispred i iza zakrilca dobivaju na važnosti pri povećanju napadnog kuta krila jer osiguravaju slijepljenost strujanja na donjoj površini te povećanje maksimalnog napadnog kuta krila prije sloma uzgona.



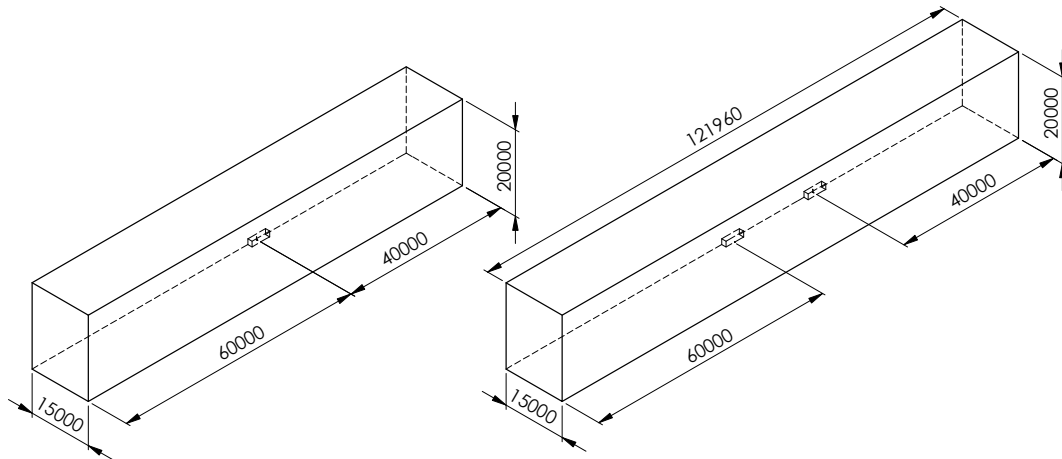
Slika 88. Princip rada Gurney zakrilca

## 7.4 Postavke numeričke simulacije

Numerička simulacija izvedena je prema proceduri iznesenoj u Poglavlju 6. te će u ovom dijelu navedene biti samo razlike u odnosu na prethodno opisani postupak.

#### 7.4.1 Dimenzije domene

S obzirom da se ne pokušava replicirati rezultate eksperimenta, dimenzije domene strujanja odabrane su dovoljno velikima da ne utječu na strujanje ispred i iza samog vozila, što znači otprilike 5-10 duljina vozila ispred samog vozila, 10-15 duljina iza vozila te 3-5 duljina vozila bočno.



Slika 89. Dimenzije simetričnih domena u mm za samostalni model te modele s razmakom  $x / L = 4$

Dimenzije domene prema preporukama iz [11], [18] više nego osiguravaju da zidovi domene neće imati utjecaja na rezultate simulacije, te test konvergencije veličine domene pri kojoj veličina relativne promjene rezultata pada ispod 2% nije izvođen.

#### 7.4.2 Rubni uvjeti

Ulaznom presjeku domene dodijeljen je rubni uvjet ulazne brzine s 40 m/s u pozitivnom smjeru osi  $z$ . Izlazni presjek modeliran je kao tlačni izlaz pri atmosferskom tlaku, dok su ostalim zidovima domene dodijeljeni rubni uvjeti simetrije. Zidu koji predstavlja tlo dodijeljen je rubni uvjet pokretnog zida i to translacijskim gibanjem u smjeru pozitivne osi  $z$  brzinom 40 m/s.

Kotačima vozila dodijeljeni su rubni uvjeti rotacijskog zida sa središtem u koordinatama centara kotača (0, 330,  $\pm 1185$ ) mm gdje je pozitivna vrijednost osi  $z$  dodijeljena

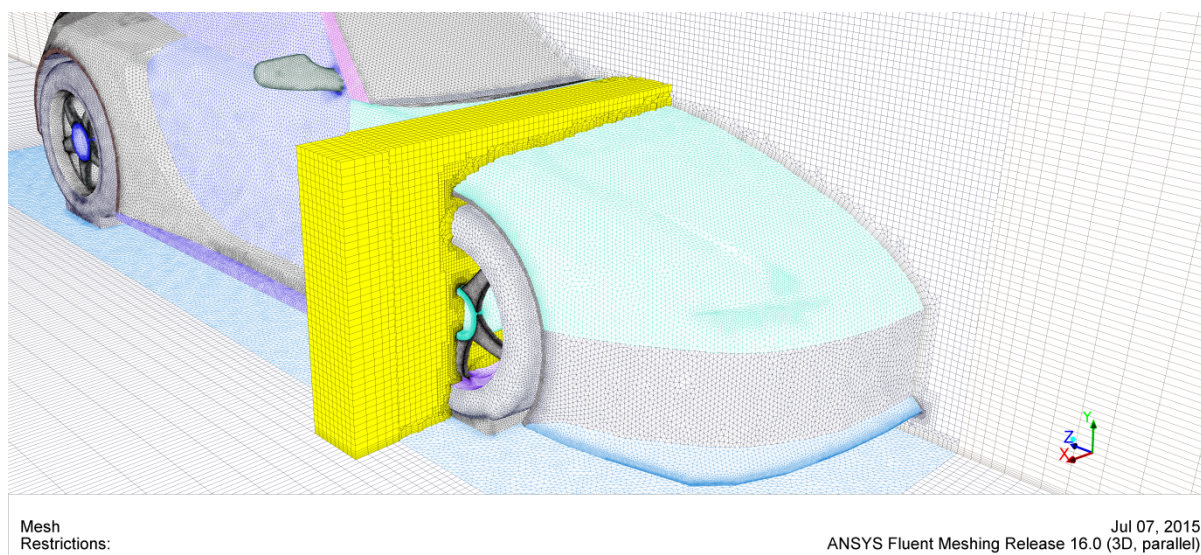
stražnjem kotaču, a negativna prednjem. Kotači rotiraju kutnom brzinom od 120 rad/s oko negativnog smjera osi  $x$ . Brzina rotacije slijedi iz izraza

$$\omega_k = 2 \cdot \pi \cdot n_k \cdot = 2 \cdot \pi \cdot \frac{v_\infty}{d_k \cdot \pi} = 120 \text{ s}^{-1}. \quad (7.1)$$

Kotačima pratećih vozila mijenjan je iznos  $z$  koordinate osi rotacije u ovisnosti o njihovoj udaljenosti  $x / L$  od vodećeg vozila.

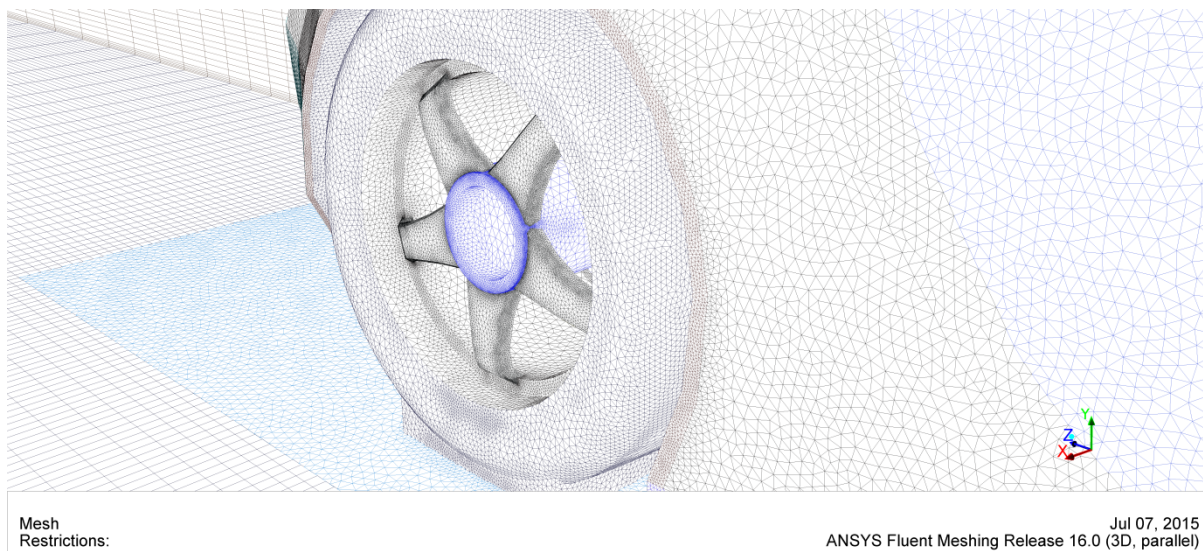
## 7.5 Diskretizacijska mreža za FZR model

Postupak izrade mreža za FZR modele identičan je onome iznesenom u Poglavljima 6.1 do 6.6, stoga će u nastavku biti iznesene samo razlike u odnosu na spomenuti postupak. Prema metodi odabira srednje duljine površinskih elemenata vozila prema Slika 42., odabrani su elementi duljine 16 mm što je rezultiralo prosječnom vrijednošću  $y^+ \sim 150$ , te mreža za model bez krila s 9,96 milijuna elemenata spada u klasu mreža srednje kvalitete. Veličina heksaedarskih elemenata unutar volumena vozila ograničena je na maksimalno 20 mm što odgovara veličini elementa na stranicama tunela s kojima će volumen vozila biti u dodiru putem sučelja.



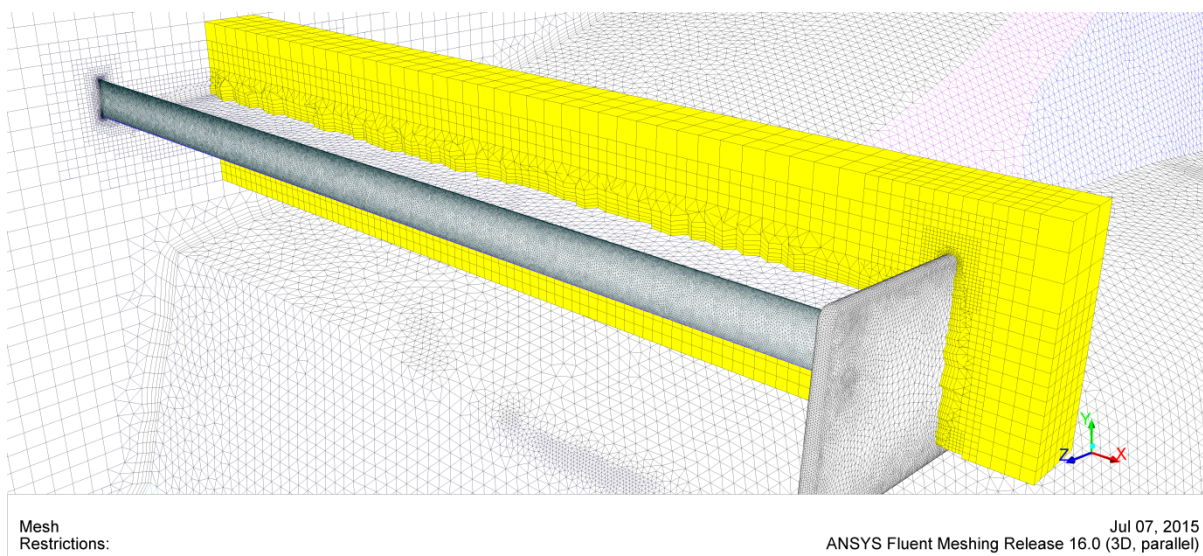
Slika 90. Prikaz mreže FZR modela





Slika 91. Detalj mreže stražnjeg kotača

Mreža za krilo FZR modela napravljena je zasebno u ANSYS Meshing softverskom paketu koji podržava *Delaunay* triangulaciju<sup>13</sup> što omogućuje finiju kontrolu nad rastom trokutnih površinskih elemenata u odnosu na *octree* metodu ICEM CFD-a korištenu na modelu vozila.

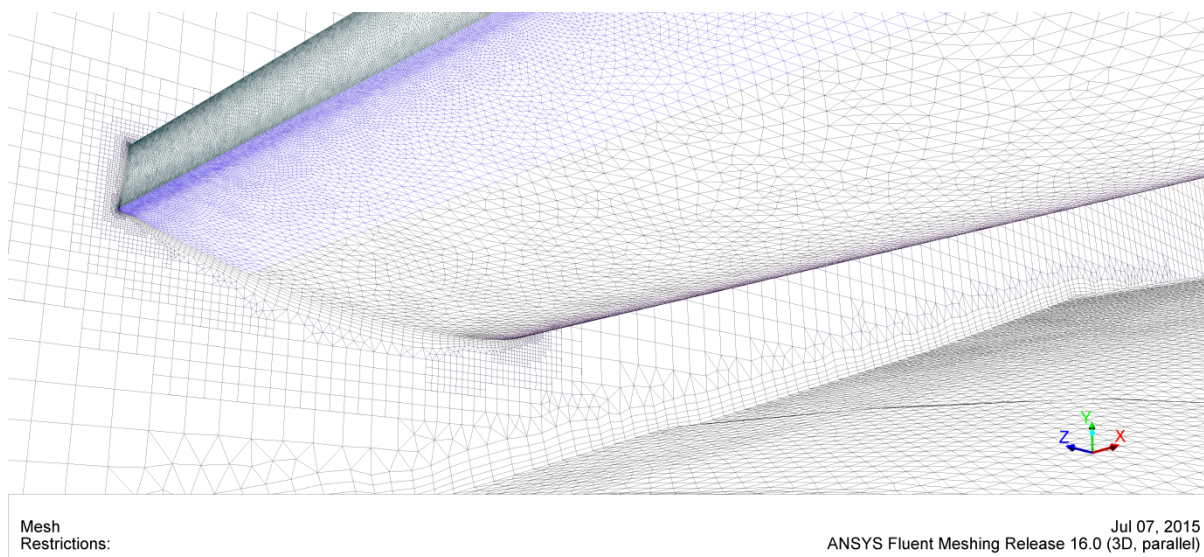


Slika 92. Presjek volumenske mreže oko krila FZR modela

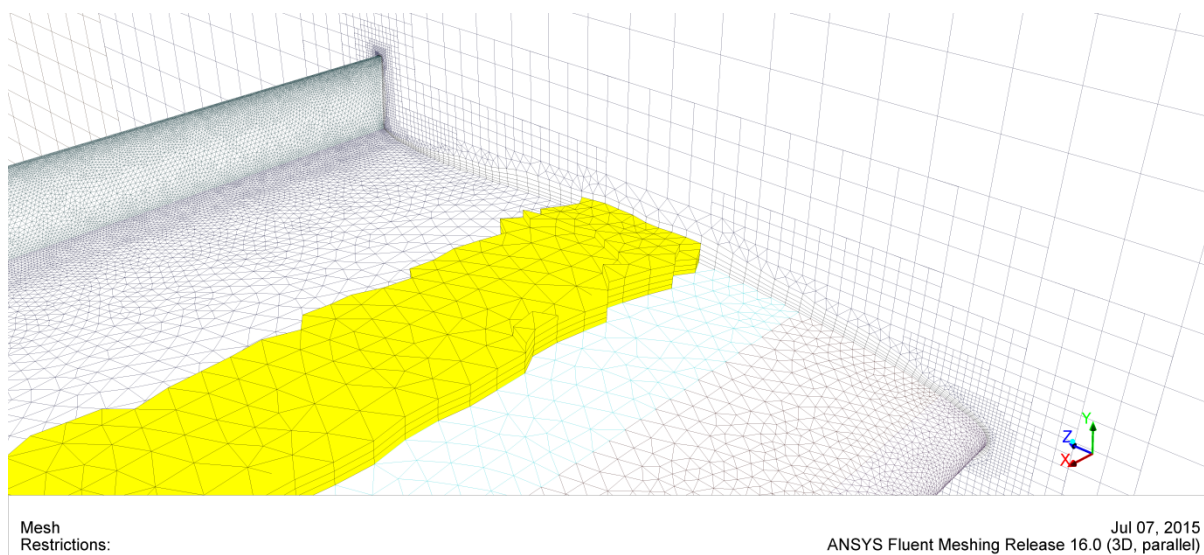
Faktor rasta površinske mreže krila zadan je na 1,075 tj. 7,5% a samo krilo je podijeljeno u logičke cjeline koje omogućuju još finiju kontrolu nad maksimalnom veličinom elemenata. Tako su na donjim površinama krila maksimalne veličine elemenata 9 mm na

<sup>13</sup> Delaunay triangulacija je jedinstvena triangulacija načinjena tako da niti jedna točka iz skupa S ne leži u opisanoj kružnici drugog trokuta.

središnjem dijelu krila i 10 mm na dijelu izlaznog ruba. Na gornjim površinama gdje se očekuje sporije strujanje, maksimalne veličine elemenata su od 13 do 15 mm.



Slika 93. Detalji mreže donjih površina krila

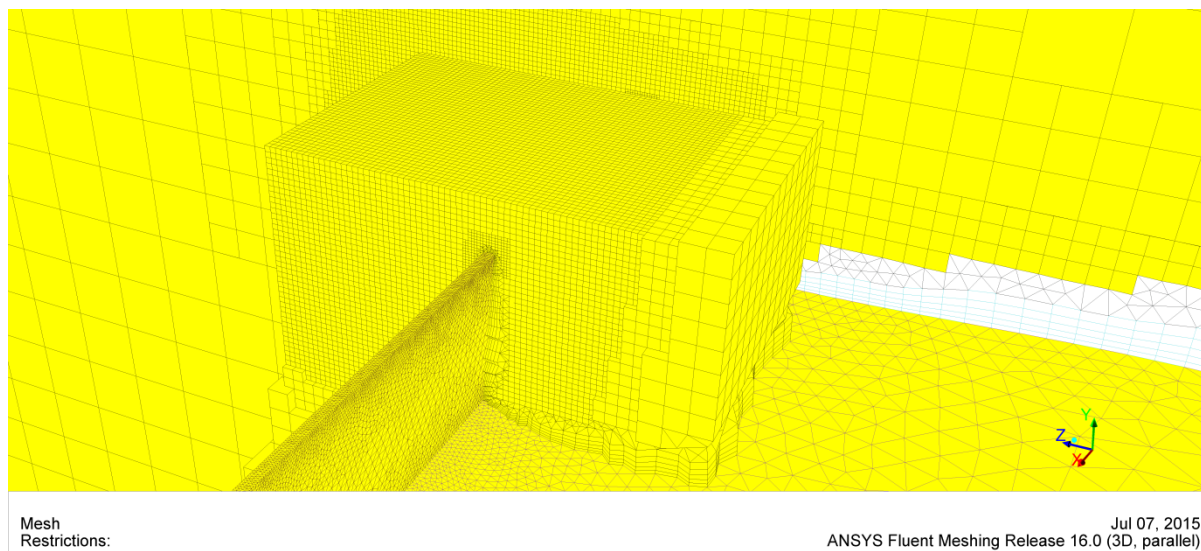


Slika 94. Detalji mreže gornjih površina krila

Veličine elemenata u područjima zakrivljenosti geometrije i bliskih stijenki definirane su funkcijama povećanja za zakrivljenost i blizinu (engl. *curvature and proximity sizing functions*). Najmanja dopuštena veličina elementa za prognošćivanje zakrivljenosti jest 0,4 mm i slijedi iz uvjeta da najkraći rub u domeni mora biti pokriven s minimalno 5 elemenata (debljina Gurney zakrilca od 2 mm). Slijedom navedenoga postignuta je odgovarajuća raspodjela  $y^+$  na svim površinama krila. Nakon prvog rješavanja slučaja



opstrujavanja FZR modela s krilom, napravljeno je potrebno progušćenje mreže na mjestima pojave vezanih vrtloga zakrilca s elementima veličine 1,25 mm (Slika 95).



Slika 95. Progušćenje mreže u područjima vrtloga Gurney zakrilca

## 7.6 Tehnika rješavanja

Praćena je tehnika rješavanja iznesena u poglavlju 6.7.3 za Ahmedovo tijelo, uz razliku u faktorima podrelaksacije varijabli koja je bila potrebna zbog postizanja konvergencije kompleksnijeg problema. Razlike su obuhvaćene sljedećom tabelom.

Tabela 17. Faktori podrelaksacije za slučajeve FZR modela

Veličina	Vrijednost $\alpha$
Tlak	0.25
Brzina	0.25
Turbulentna kinetička energija $k$	0.6
Disipacija turbulentne kinetičke energije $\varepsilon$	0.6
Turbulentna viskoznost	0.8

## 7.7 Rezultati numeričke simulacije samostalnog FZR modela bez krila

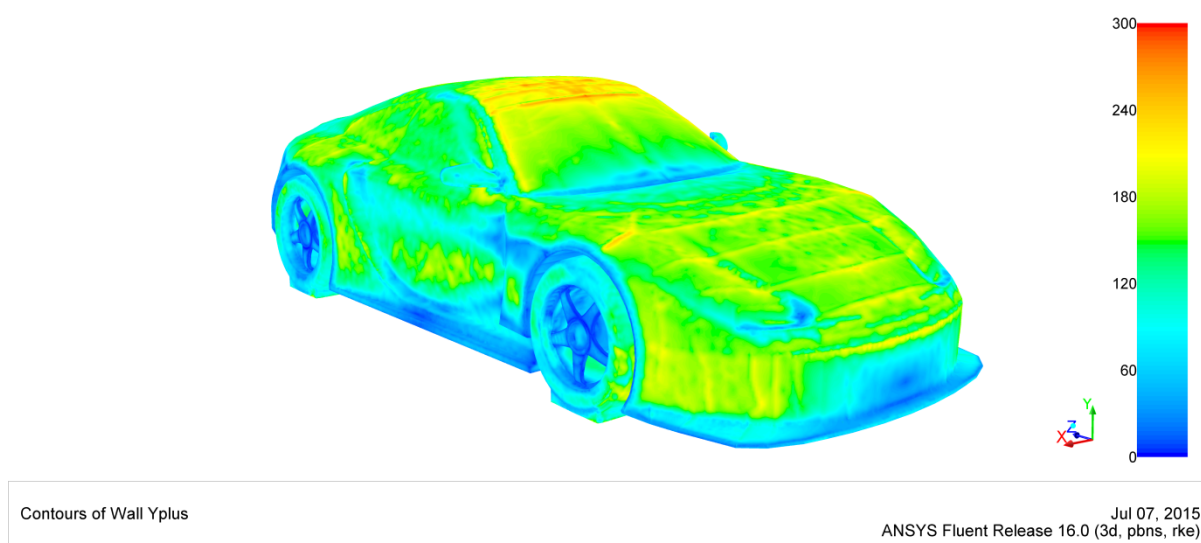
Prvi korak pri rješavanju bio je izvesti numeričku simulaciju samostalnog FZR modela bez krila koji bi poslužio kao osnovica usporedbe utjecaja koje će krilo imati na vozilo, njegove koeficijente otpora, uzgona te sliku strujanja oko vozila (Tabela 18.). U nastavku rada sve vrijednosti pozitivnog uzgona biti će označavane crvenom bojom kao

nepoželjne, dok će poželjne vrijednosti negativnog uzgona biti označavane zelenom bojom.

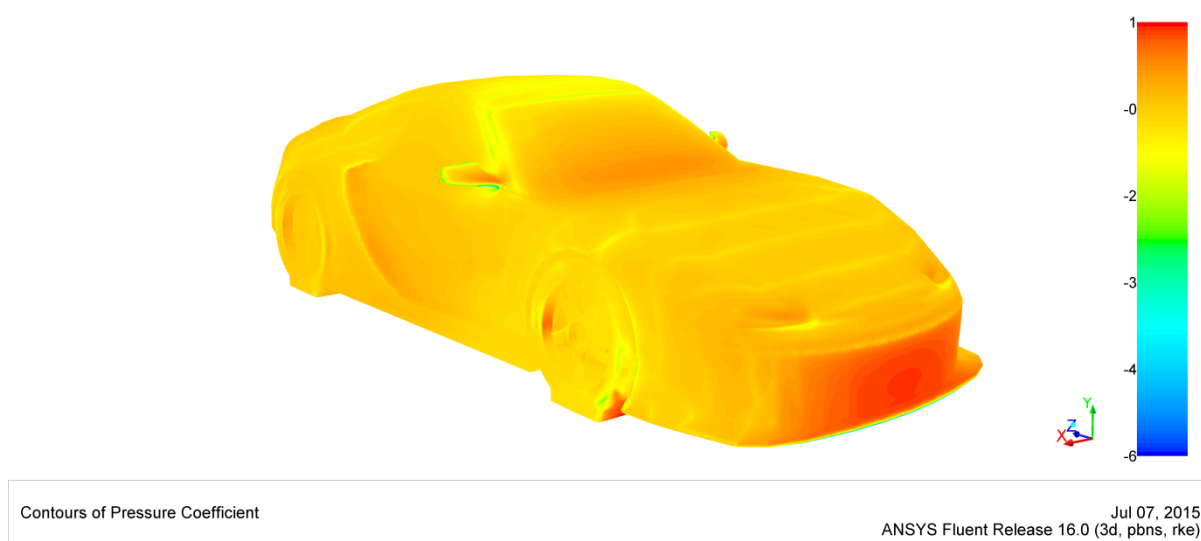
Tabela 18. Koeficijenti aerodinamičkih sila na FZR model bez krila

#	vozilo	$n$ , broj volumena	$C_D$	$C_L$	$C_{L,f}$	$C_{L,r}$	$\Delta C_D$	$\Delta C_L$
1	<b>FZR-NW samostalni</b>	<b>9 964 081</b>	<b>0,288</b>	<b>-0,012</b>	<b>-0,149</b>	<b>0,137</b>	—	—

Raspodjelu vrijednosti  $y^+$  te bezdimenzijskog koeficijenta tlaka  $C_p$  na FZR modelu bez krila prikazuju sljedeće slike.

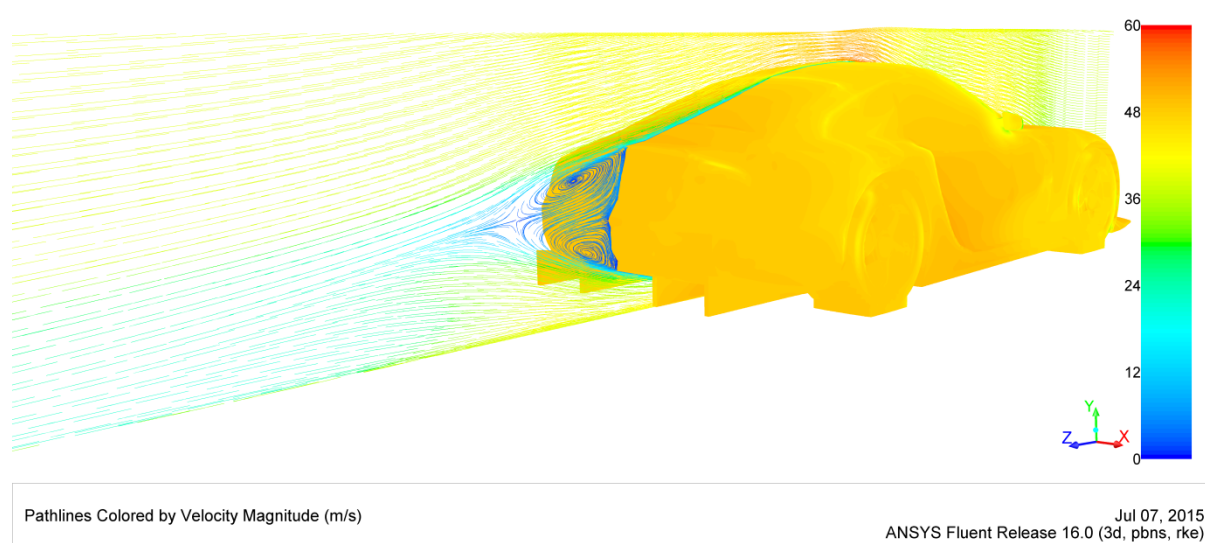


Slika 96. Raspodjela  $y^+$  na FZR modelu



Slika 97. Raspodjela bezdimenzijskog koeficijenta tlaka  $C_p$  na FZR modelu

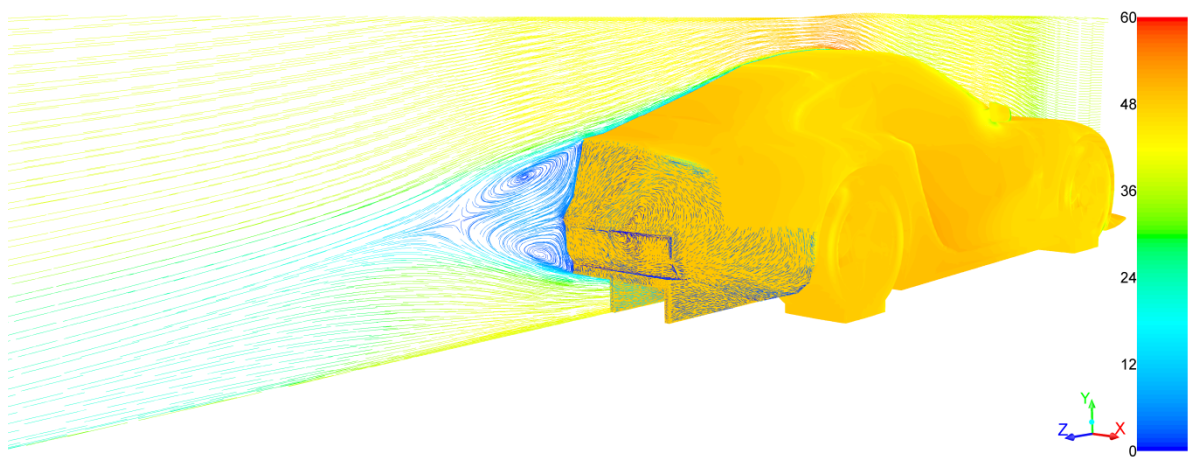
S obzirom na geometriju modela koja odgovara *fastback*<sup>14</sup> izvedbi karoserije očekivalo se slijepljeno strujanje preko stražnjeg vjetrobranskog stakla te poklopca motora skroz do stražnjih vertikalnih stranica vozila, te aerodinamički trag sličan onome kod Ahmedovog tijela s kutom nagiba stražnje kosine od 25° tj. par protusmjerno rotirajućih vrtloga između gornjih stranica vozila i podnice. Slika 98. prikazuje model vozila s prikazanim konturama raspodjele  $C_p$  te strujnice u ravnini simetrije vozila koje prikazuju brzinu strujanja.



Slika 98. Strujanje u ravnini simetrije aerodinamičkog traga FZR modela

Prikaz površinskih strujnica (engl. *oil flow*) na stražnjem dijelu vozila ukazuje na dodatno vrtloženje pri bočnom pomaku po stražnjem dijelu vozila (Slika 99). Prikazom strujnica koje se odvajaju sa stražnjih površina vozila dobivamo potpuniju sliku vrtložnog traga vozila bez krila (Slika 100). U konačnici, prikazom strujnica sa središnjeg dijela modela vidljivo je slijepljeno strujanje na stražnjim površinama tipično za spomenutu *fastback* konfiguraciju karoserije (Slika 101).

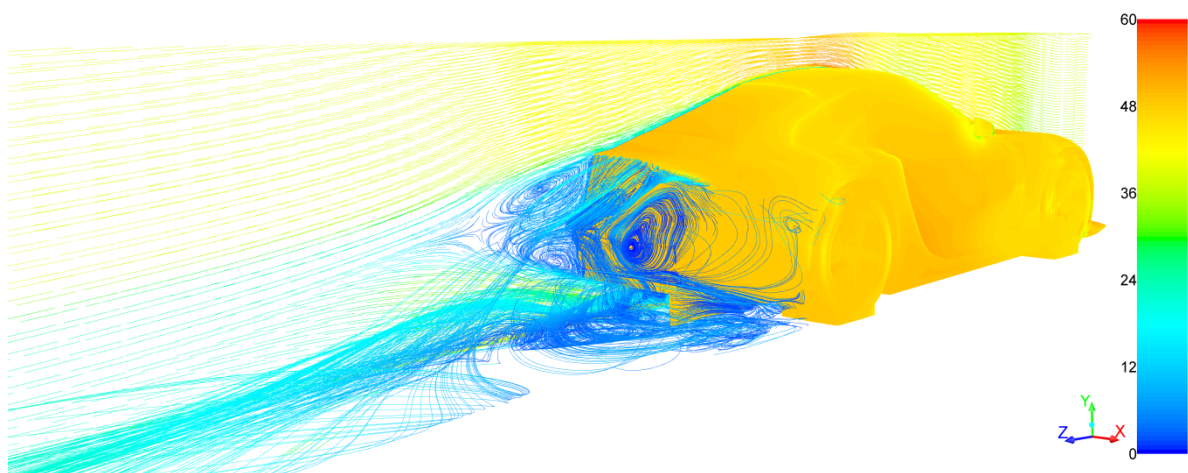
<sup>14</sup> *fastback* je izvedbeni stil karoserije vozila sa blagim kontinuiranim nagibom od linije krova do stražnjeg dijela automobila.



Pathlines Colored by Velocity Magnitude (m/s)

Jul 07, 2015  
ANSYS Fluent Release 16.0 (3d, pbns, rke)

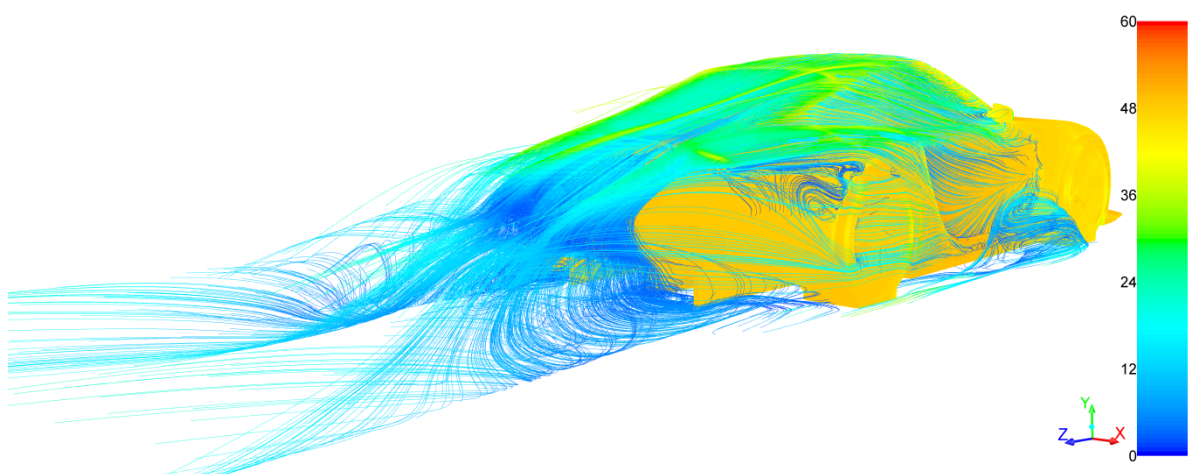
Slika 99. Površinske strujnice na stražnjim stranicama FZR modela



Pathlines Colored by Velocity Magnitude (m/s)

Jul 07, 2015  
ANSYS Fluent Release 16.0 (3d, pbns, rke)

Slika 100. Strujnice s polazištem na stražnjim stranicama FZR modela



Pathlines Colored by Velocity Magnitude (m/s)

Jul 07, 2015  
ANSYS Fluent Release 16.0 (3d, pbns, rke)

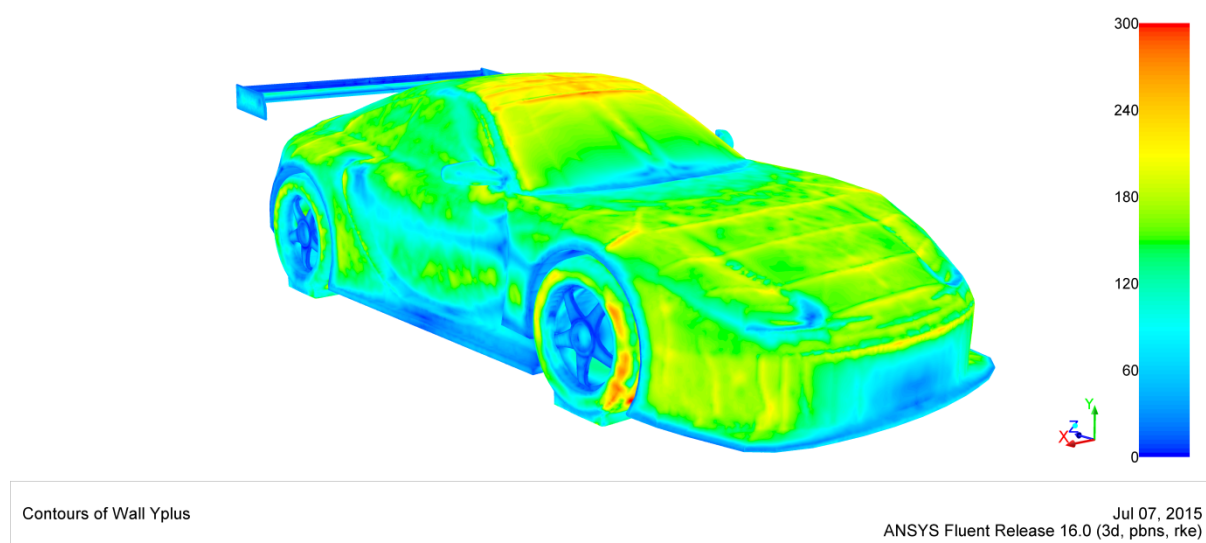
Slika 101. Strujnice s polazištem na središnjem dijelu FZR modela

## 7.8 Rezultati numeričke simulacije samostalnog FZR modela s krilom

Provedena je numerička simulacija samostalnog FZR modela s krilom izrađenim sukladno postupku iznesenom u poglavlju 7.3. Očekivane razlike u pretpostavljenoj strukturi strujanja iza modela nakon ugradnje krila bile su:

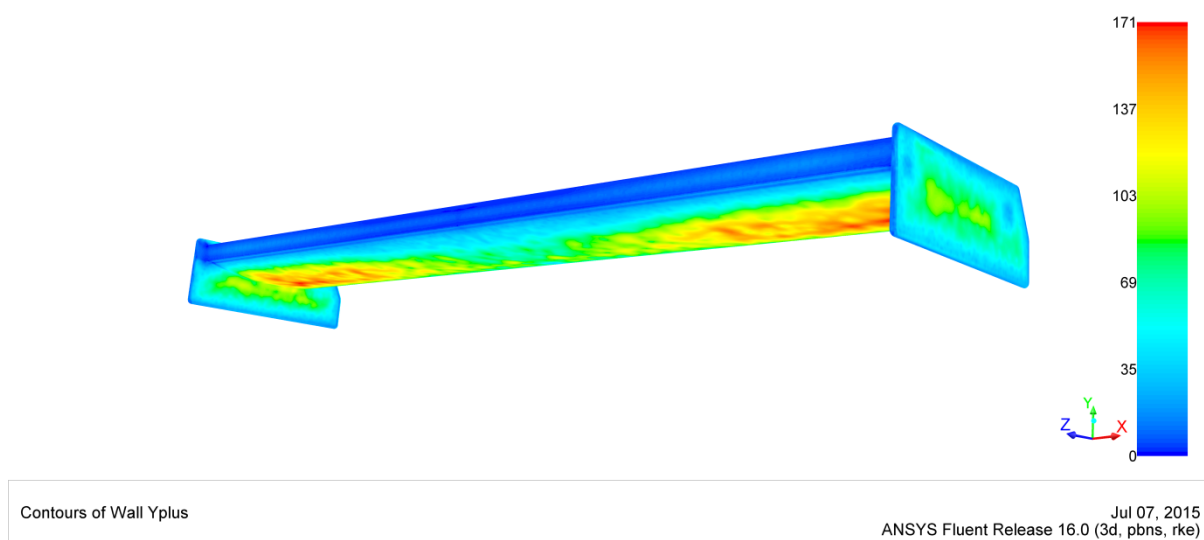
- vertikalni pomak vrtloga iza modela prema gore zbog sniženog tlaka s donje strane krila,
- ubrzanje strujanja iz područja podnice na izlasku iz difuzora zbog istog razloga,
- promjena smjera strujanja iza bolida prema gore zbog prisutnosti krila (engl. *upwash*),
- pojava protusmjerno rotirajućih vrtloga s terminizona krila,
- ukupno povećanje aerodinamičkog traga vozila.

Raspodjelu vrijednosti  $y^+$  na FZR modelu s krilom prikazuje sljedeća slika. Vrijedni napomenuti da je maksimalna vrijednost  $y^+$  postignuta na prednjim kotačima zbog rubnog uvjeta rotirajućeg zida koji je na istima zadan. Maksimalna vrijednost  $y^+$  na stražnjem krilu iznosi  $\sim 170$  te se nalazi na donjoj površini krila gdje je i očekivana veća brzina strujanja. Raspodjelu  $y^+$  na stražnjem krilu u lokalnom razmjeru ( $0 \leq y^+ \leq 170$ ) prikazuje Slika 103.



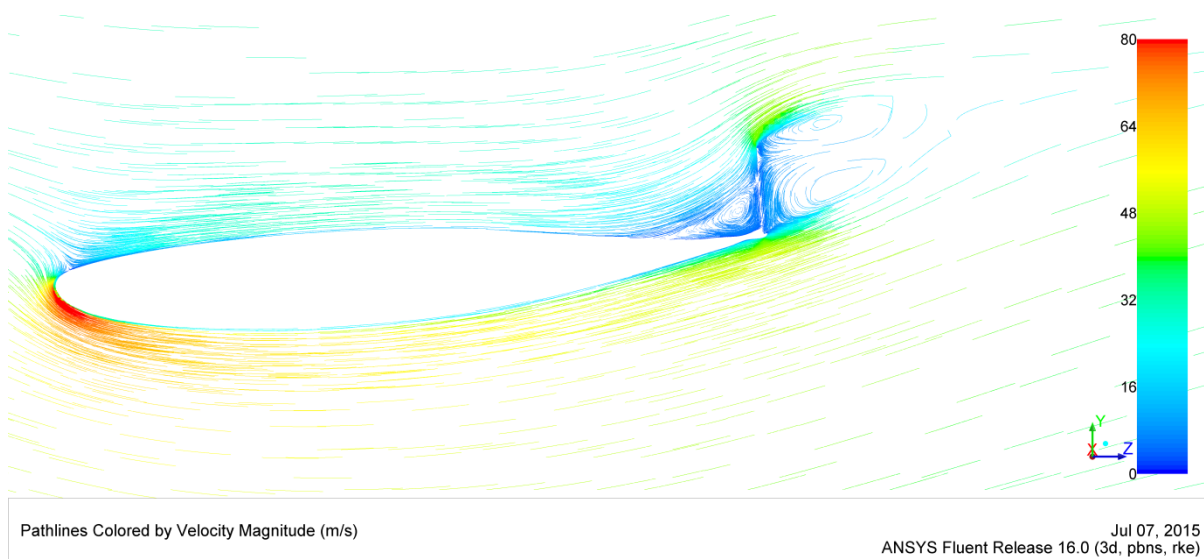
Slika 102. Raspodjela  $y^+$  na FZR modelu s ugrađenim krilom





Slika 103. Raspodjela  $y^+$  na stražnjem krilu FZR modela

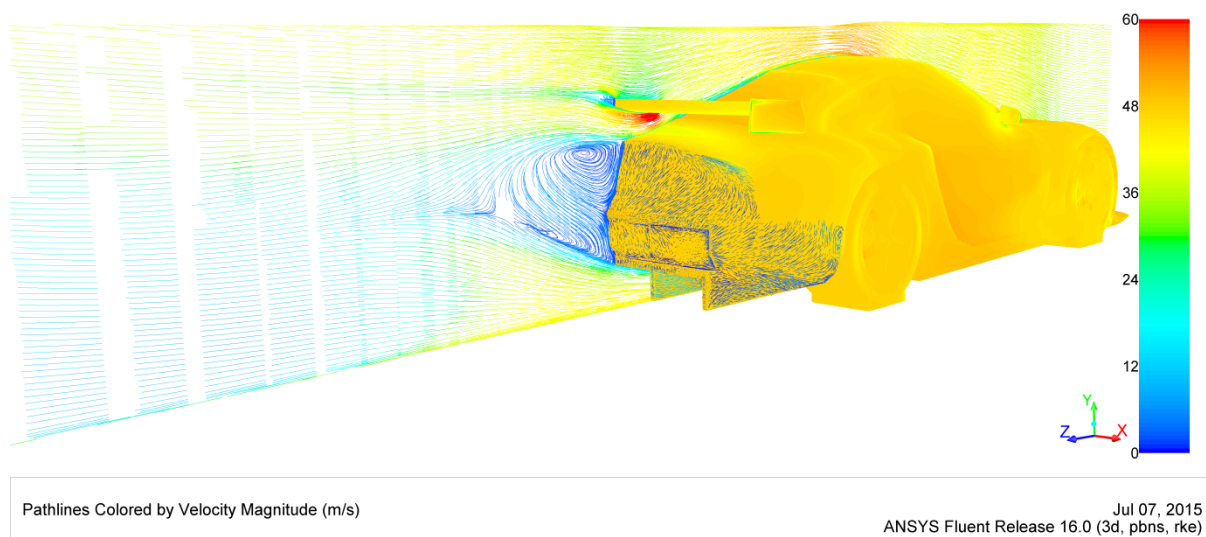
Usporedbom predviđene strukture strujanja u blizini Gurney zakrilca prikazane na Slika 88. te onom dobivenom numeričkom simulacijom (Slika 104.) uočava se izvrsno poklapanje rezultata s pretpostavkama iznesenim na temelju istraživanja prema [26], [27].



Slika 104. Struktura strujanja u blizini Gurney zakrilca

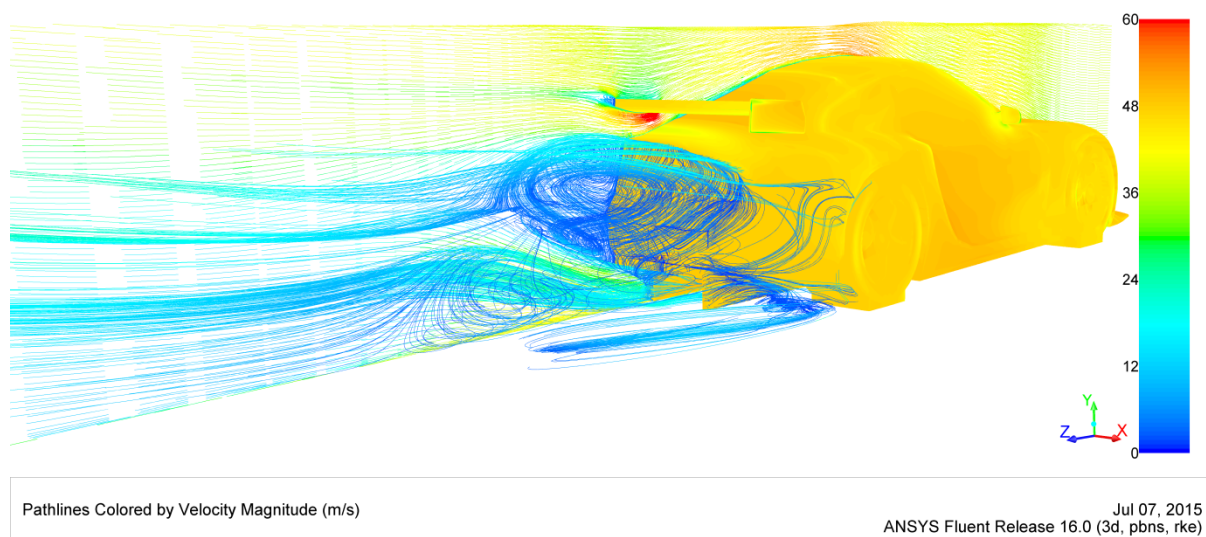
Strukture strujanja u ravnini simetrije i pozadini samostalnog FZR modela s krilom prikazane su sljedećim slikama.





**Slika 105. Površinske strujnice i strujnice u ravni simetrije FZR modela s krilom**

Usporedbom sa Slika 98. vidljiv je očekivani pomak vrtloga u ravni simetrije vertikalno prema gore te povećanje brzine strujanja koje izlazi iz područja podnice vozila.

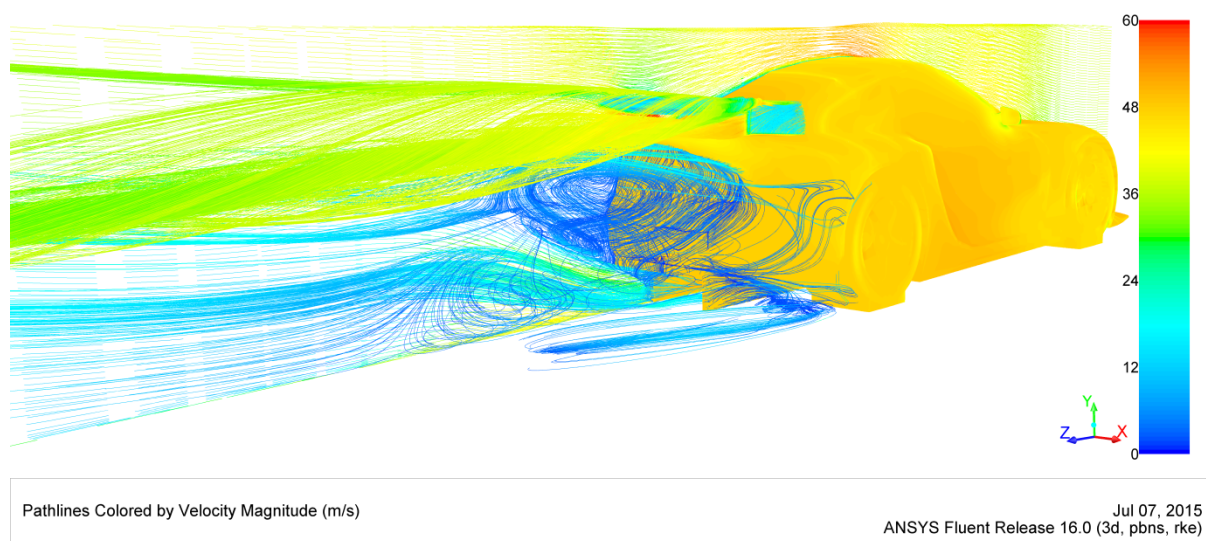


**Slika 106. Vrtložni trak FZR modela u prisustvu krila**

Također, usporedbom sa Slika 100. može se primijetiti novo usmjerenje prema gore cjelokupnog područja vrtložnog traga zbog *upwash*-a krila.

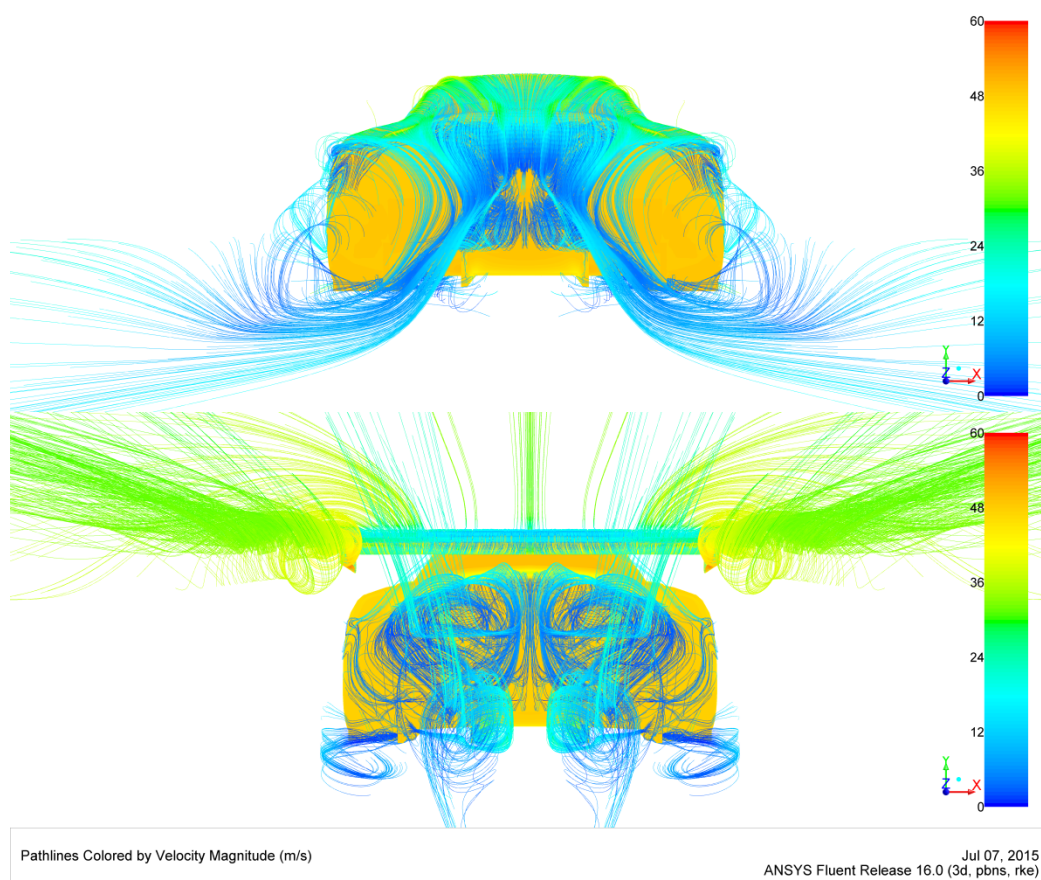
Krilo kao aerodinamički element unosi velike količine energije u strujanje iza bolida te je odgovorno za povećanje sile otpora koja se naziva inducirani otpor (engl. *induced drag*, *vortex drag*). Inducirani otpor javlja se zbog preusmjeravanja strujanja koje se događa na krilu u svrhu proizvodnje uzgona.

Pretpostavljeni protusmjerno rotirajući vrtlozi koji se odvajaju s terminizona krila vidljivi su na sljedećoj slici.



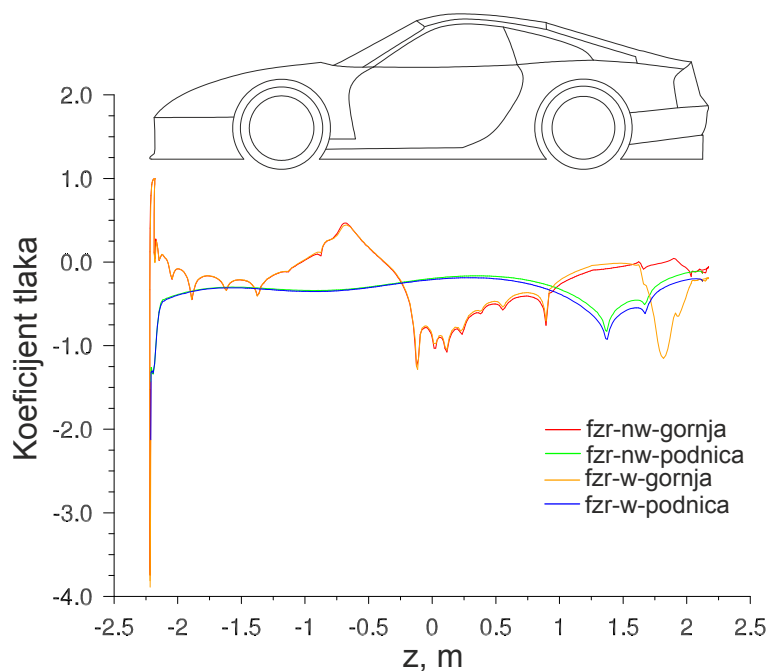
Slika 107. Odvajanje rotirajućih vrtloga s bočnih rubova krila

Usporedbom vrtložnih tragova FZR modela s krilom i bez krila, očite su razlike u veličini, kompleksnosti i razini energije koja se nalazi u svakom od vrtložnih tragova.



Slika 108. Usporedba aerodinamičkih tragova FZR modela bez krila i s krilom

Pretpostavku o ubrzanju strujanja u području podnice zbog prisutnosti krila potvrđuje dijagram na Slika 109. Usporedno su prikazane raspodjele koeficijenta tlaka po simetrali vozila za vozilo s krilom (narančasta i plava boja) i vozilo bez krila (crvena i zelena boja).



Slika 109. Dijagram raspodjele koeficijenta tlaka po simetrali vozila

Primjećuje se pad koeficijenta tlaka u području podnice od sredine vozila prema njegovom kraju (plava linija je ispod zelene). Iako pad tlaka nije velik, treba držati na umu da je podnica vrlo velike površine tako da malena promjena u tlaku rezultira značajnim povećanjem negativnog uzgona. Usporedba iznosa sila negativnog uzgona u području podnice izvezena iz FLUENT-a potvrđuje rečeno (Tabela 19) te je vidljiv porast negativnog uzgona od 10,5% kod FZR modela s krilom.

Tabela 19. Usporedno izvješće o silama uzgona podnica FZR modela s i bez krila

**SAMOSTALNI MODEL BEZ KRILA**

Forces - Direction Vector (0 1 0)			
Forces (n)			
Zone	Pressure	Viscous	Total
fzs/p20-underbody	-811.62408	0.12403337	-811.50005

**SAMOSTALNI MODEL S KRILOM**

Forces - Direction Vector (0 1 0)			
Forces (n)			
Zone	Pressure	Viscous	Total
fzs/p20-underbody	-897.06793	0.1262684	-896.94166

Sljedeća tabela daje pregled rezultata i usporedbu iznosa koeficijenata aerodinamičkih sila sa samostalnim FZR modelom bez krilom.

**Tabela 20. Koeficijenti aerodinamičkih sila na FZR model s krilom**

#	vozilo	$n$ , broj volumena	$C_D$	$C_L$	$C_{L,f}$	$C_{L,r}$	$\Delta C_D$	$\Delta C_L$
1	FZR-NW samostalni	9 964 081	0,288	-0,012	-0,149	0,137	—	—
2	FZR-W samostalni	12 869 929	0,372	-0,531	-0,019	-0,512	+0,084	-0,519

Usporedba rezultata povlači sljedeće zaključke:

- FZR model bez krila stvarao je neznatan negativni uzgon, ali je raspodjela uzgona na prednju i stražnju osovinu bila takva da je vozilo imalo tendenciju preupravljanja (engl. *oversteer*) tj. gubitka trakcije na stražnjim kotačima,
- iako navedeno opažanje ukazuje na potrebu za krilom kao aerodinamičkom napravom za stvaranje negativnog uzgona baš na kraju vozila gdje je on najpotrebniji, stavljanje realnog aeroprofila na pojednostavljenu geometriju vozila rezultiralo je prevelikim povećanjem negativnog uzgona na stražnjoj osovini.

Razlog leži u odveć pojednostavljenoj geometriji prednjeg kraja vozila koje nema uobičajene aerodinamičke naprave poput izduljenog razdjelnika (engl. *splitter*), zakrilaca na stranama prednjeg odbojnika te prestrujnih kanala za usmjeravanje značajnije količine zraka prema podnici vozila i kočionom sustavu. Svi ovi elementi doveli bi do povoljnije distribucije sile negativnog uzgona i doveli vozilo u aerodinamički balans. FZR model vozila ima statičku raspodjelu težine u omjeru 37,5% sprijeda i 62,5% straga te bi povoljan aerodinamički balans bio sličnog omjera s malo većom tendencijom straga zbog sigurnosti koju bi takva raspodjela pružala u vožnji. Trenutni omjer aerodinamičkog balansa je 3,6% sprijeda i 96,4% straga što bi rezultiralo prevelikim podupravljanjem (engl. *understeer*) vozila tj. slabim odazivom na manevre skretanja. Također, aerodinamički balans važan je i u longitudinalnom smjeru vožnje te o njemu ovise mogućnosti ubrzanja i usporenja vozila. Trenutni aerodinamički balans bio bi izvrstan na izlasku iz zavoja i ubrzanju kada je kritična sila adhezije između kotača i podloge koja

ovisi o vertikalnoj sili na kotač, ali pri kočenju i inicijaciji skretanja vozilo bi bilo neupravljivo. Situacija bi postajala progresivno lošija što bi se brzina vožnje povećavala te bi aerodinamičke karakteristike rasle u važnosti nad uobičajenim dinamičkim karakteristikama.

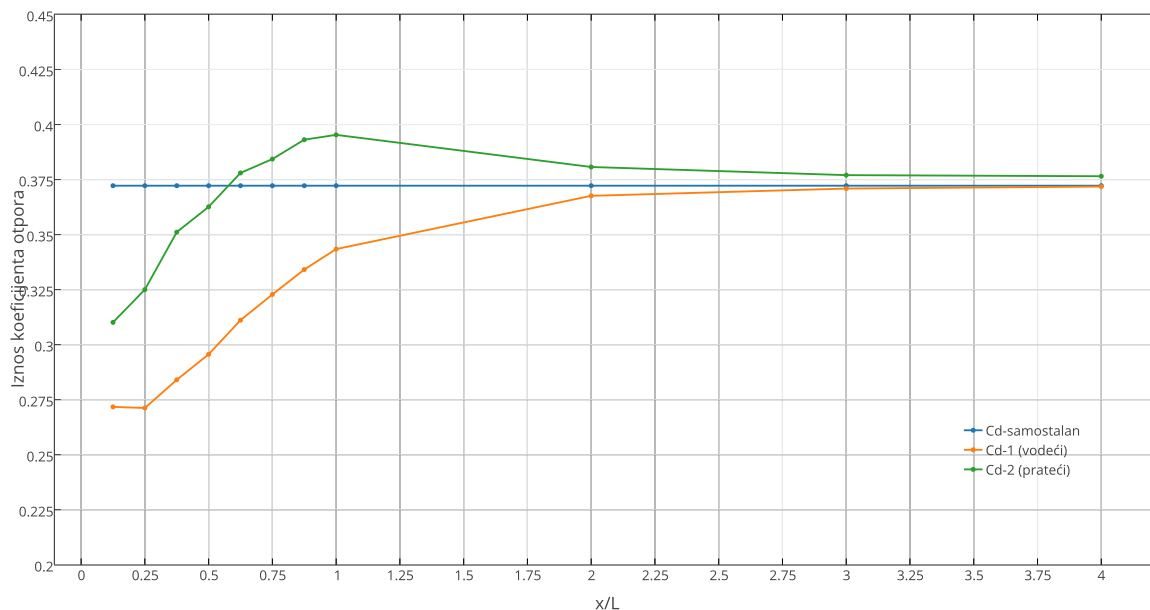
Kao što je rečeno u poglavljima 7.1 i 7.2, s obzirom na komparativnu prirodu rada i održavanje vjernosti geometrije izvornog modela, nisu uvedena poboljšanja geometrije prednjeg kraja u svrhu povoljnijeg aerodinamičkog balansa. Daljnji rezultati numeričke simulacije kao referentnu vrijednost koriste isključivo FZR model s ugrađenim krilom.

### **7.9 Rezultati numeričke simulacije dvaju FZR modela pri međusobnim razmacima $0.125 \leq x / L \leq 4$**

Sukladno postupku iznesenom u poglavljima 6.1 do 6.7 te nadopunjenom u poglavljima 7.4 do 7.6, simulirano je opstrujavanje dvaju FZR model s ugrađenim krilom izvedenim u skladu s FIA LM GTE tehničkim pravilnikom, u svrhu ispitivanja utjecaja *draftinga* dvaju vozila GT klase. FZR modelima variran je međusobni razmak u rasponu  $0.125 \leq x / L \leq 4$ , gdje je  $L$  duljina FZR modela (4392 mm). Korak povećanja međusobnog razmaka iznosio je  $0,125L$  do udaljenosti jedne duljine FZR modela (8 koraka), te  $1L$  sve do udaljenosti od  $4L$ . Brzina strujanja pri numeričkoj simulaciji postavljena je na 40 m/s što je uobičajena vrijednost koja se koristi pri ispitivanjima u zračnim tunelima. Reynoldsov broj za odabranu brzinu temeljen na duljini međuosovinskog razmaka iznosi  $Re = 6,506 \cdot 10^6$ . Najveća mreža korištena pri numeričkoj simulaciji bila je za međusobni razmak  $x / L = 4$  i sadržavala je 26 200 365 konačnih volumena a najmanja je bila za razmak  $x / L = 0.125$  s 25 085 523 konačnih volumena. Prosječno vrijeme rješavanja po iteraciji iznosilo je 55 sekundi, dok je za konvergenciju iznosa aerodinamičkih sila u prosjeku bilo potrebno 1500 iteracija što iznosi ~23 sata po slučaju. Rezultati numeričke simulacije dani su u nastavku.

### 7.9.1 Otpor

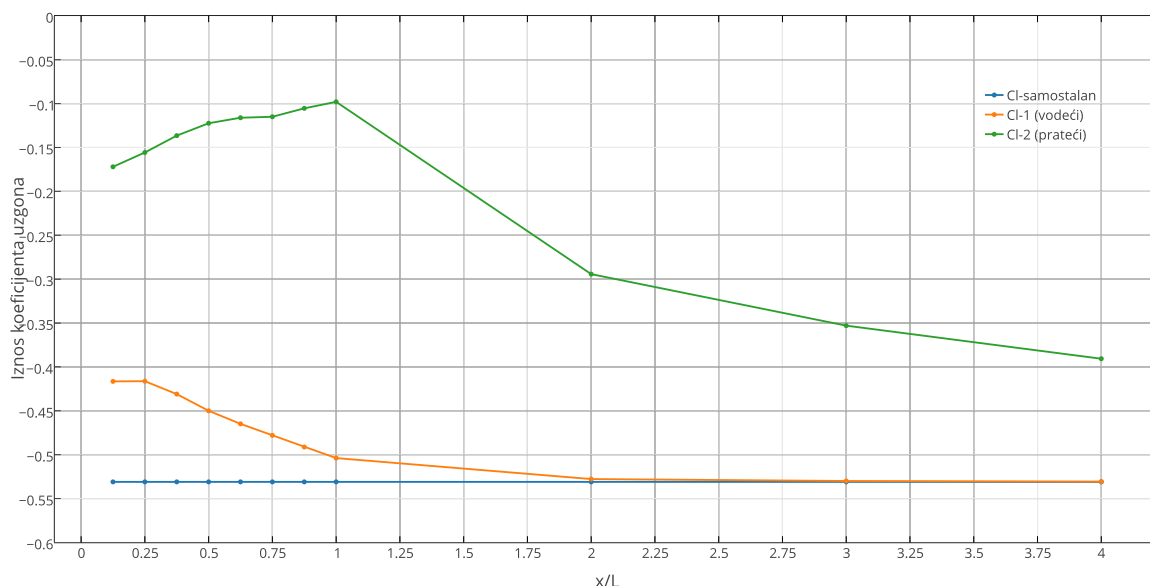
Slika 110. pokazuje ovisnost sile otpora o međusobnom razmaku FZR modela. Pronađeno je izvrsno slaganje rezultata numeričke simulacije s eksperimentalnim istraživanjima prema [9] te podacima pronađenima u literaturi [4]. Vodeći FZR model počinje osjećati smanjenje sile otpora uslijed povrata tlaka na svom stražnjem kraju zbog prisutnosti pratećeg modela već pri razmaku  $x / L = 2$  te se taj trend skoro linearno nastavlja sve do najmanjih razmaka gdje je ujedno i najveći pad sile otpora vodećeg modela od 27% u odnosu na samostalni model. Obrnuto od početne pretpostavke prije početka izrade ovog rada, prateći model vozila ne osjeća smanjenje sile otpora na svim međusobnim razmacima. Dapače, s približavanjem modelu ispred sebe, njegov otpor raste do maksimuma od 6,2% povećanja pri međusobnom razmaku  $x / L = 1$ . Daljnjim smanjenjem razmaka prateći model počinje osjećati smanjenje sile otpora, ali ona pada ispod vrijednosti za samostalno vozilo tek za međusobne razmake  $x / L < 0.625$ . Minimum sile otpora prateći model ima na najmanjoj udaljenosti od vodećeg  $x / L = 0.125$  gdje smanjenje u odnosu na samostalni model iznosi 16,7%



Slika 110. Ovisnost koeficijenta otpora o međusobnom razmaku vozila

### 7.9.2 Uzgon

Ovisnost koeficijenta uzgona FZR modela o međusobnom razmaku prikazuje Slika 111. Razvidno je da je vodeći model i ovdje u prednosti s maksimalnim padom negativnog uzgona od 21,6% pri razmacima  $0.125 \leq x / L \leq 0.25$ , dok prateći model već na razmaku  $x / L = 4$  osjeća 26,4% pad negativnog uzgona te se situacija progresivno pogoršava sve do razmaka  $x / L = 1$  gdje prateći model ima 81,5% manje uzgona nego samostalni model. Na manjim razmacima pad negativnog uzgona se okreće u lagani rast sve do najmanjih razmaka gdje još uvijek postoji gubitak od 67,6% negativnog uzgona za prateći model.

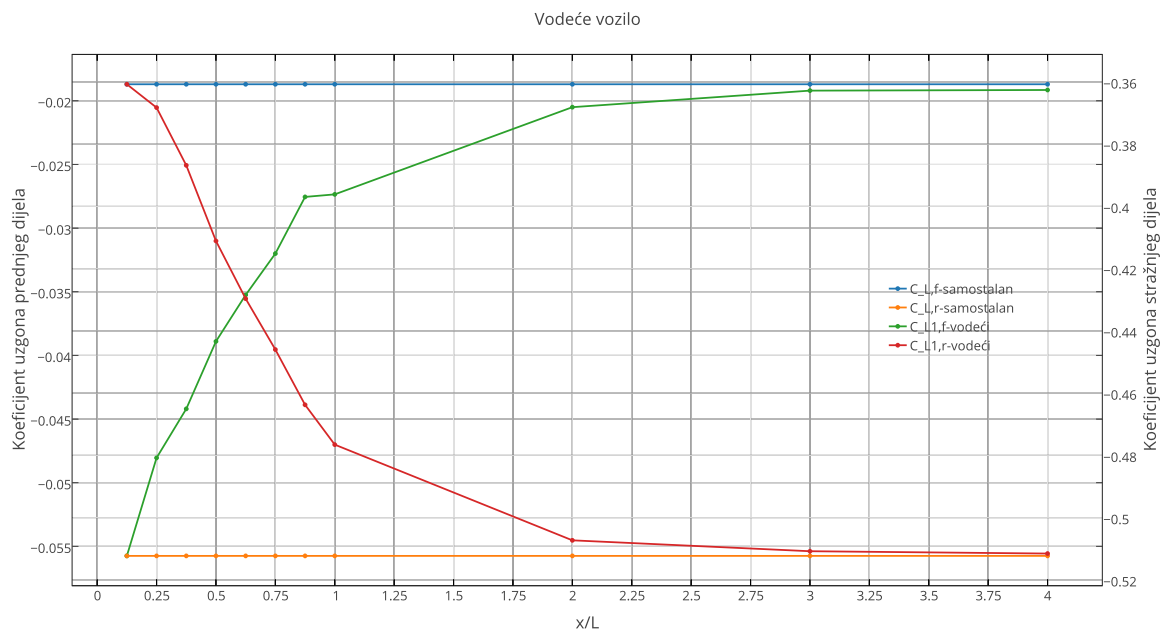


Slika 111. Ovisnost koeficijenta uzgona o međusobnom razmaku vozila

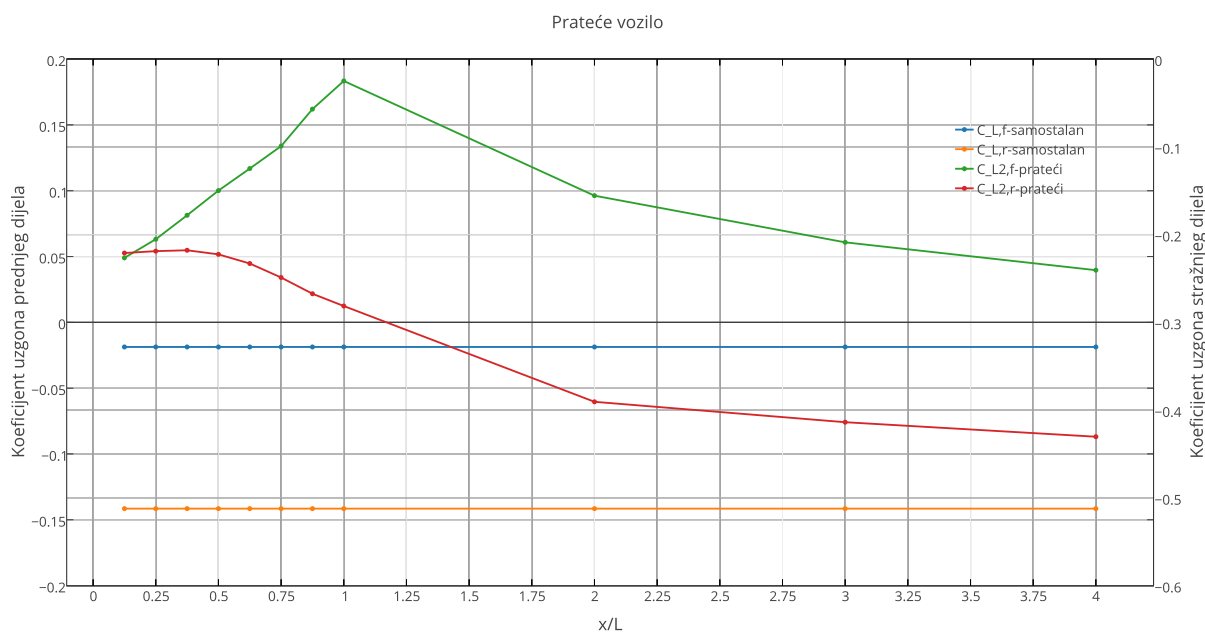
### 7.9.3 Raspodjela uzgona

Kao što je spomenuto u poglavlju 6.10.2, bez raspodjele sile uzgona na prednju i stražnju osovину, slika aerodinamičkog balansa vozila je nepotpuna. Sljedeće slike prikazuju ovisnost koeficijenta uzgona na prednjem kraju modela ( $C_{L,f}$ ) i stražnjem kraju modela ( $C_{L,r}$ ) vodećeg i pratećeg vozila o njihovom međusobnom razmaku i istim koeficijentima za samostalno vozilo.





Slika 112. Ovisnost koeficijena uzgona sprijeda i straga za vodeći model



Slika 113. Ovisnost koeficijena uzgona sprijeda i straga za prateći model

Iz rezultata je vidljivo da se aerodinamički balans vodećeg vozila mijenja na način da sa smanjenjem međusobnog razmaka stražnji kraj gubi negativni uzgon dok ga prednji u puno manjoj mjeri dobiva, što je za očekivati s obzirom na to da krilo vodećeg modela gubi efikasnost s približavanjem pratećeg modela u aerodinamičkom tragu. Maksimalni iznosi dobitka tj. gubitka uzgona po osovina dogadaju se za vrijednost međusobnog razmaka  $x / L = 0.125$  pri kojem stražnji kraj gubi 29,6% negativnog uzgona u odnosu



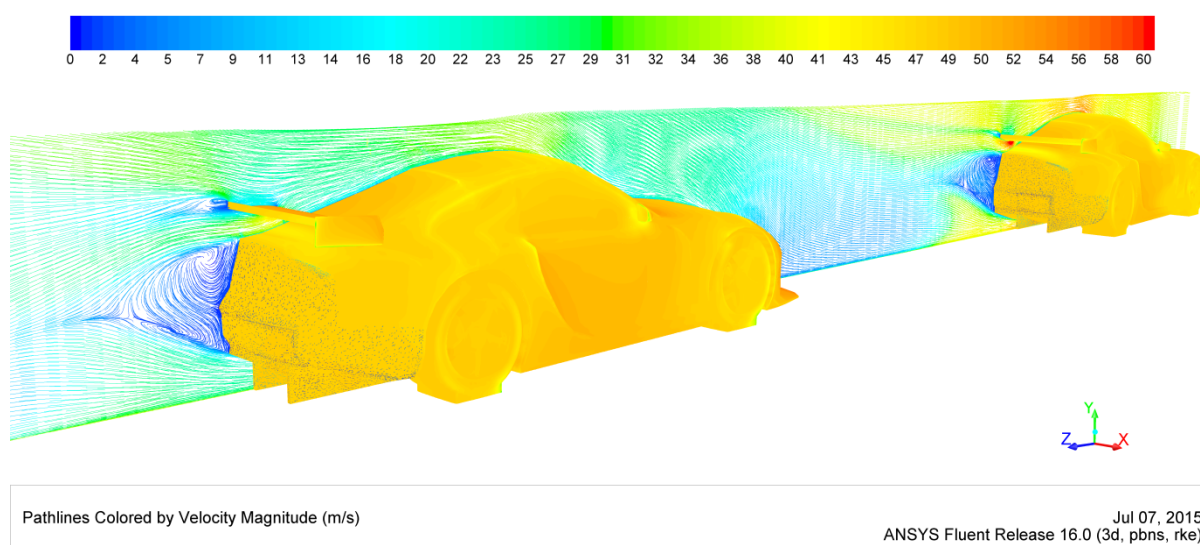
na samostalni model, dok prednji kraj dobiva 298% povećanje negativnog uzgona. Postotak nije najsretniji alat za izražavanje promjena koeficijenata uzgona, posebno kada se događa promjena iz negativnih u pozitivne vrijednosti i obrnuto, stoga se u industriji koriste "točke uzgona" ili "točke otpora" (engl. *lift count*, *lift point*) koje su tisućiti dio koeficijenta otpora ili uzgona [4]. Na primjer, jedna točka uzgona iznosi 0.001 vrijednosti koeficijenta uzgona pa se za prednji kraj vodećeg modela kojemu se koeficijent uzgona na prednjoj osovini promijenio iz  $-0,019$  u  $-0,056$  možemo reći da je dobio 37 točaka negativnog uzgona dok je stražnji kraj izgubio 151 točku negativnog uzgona.

Prateće vozilo gubi značajniju količinu stražnjeg negativnog uzgona i to maksimalno 294 točke uzgona pri međusobnom razmaku  $x / L = 0.25$ , dok koeficijent uzgona na prednjem dijelu prelazi u pozitivne vrijednosti s maksimalnim iznosom 0,183 (promjena od 202 točke uzgona u pozitivnom smjeru) pri razmaku  $x / L = 1$ .

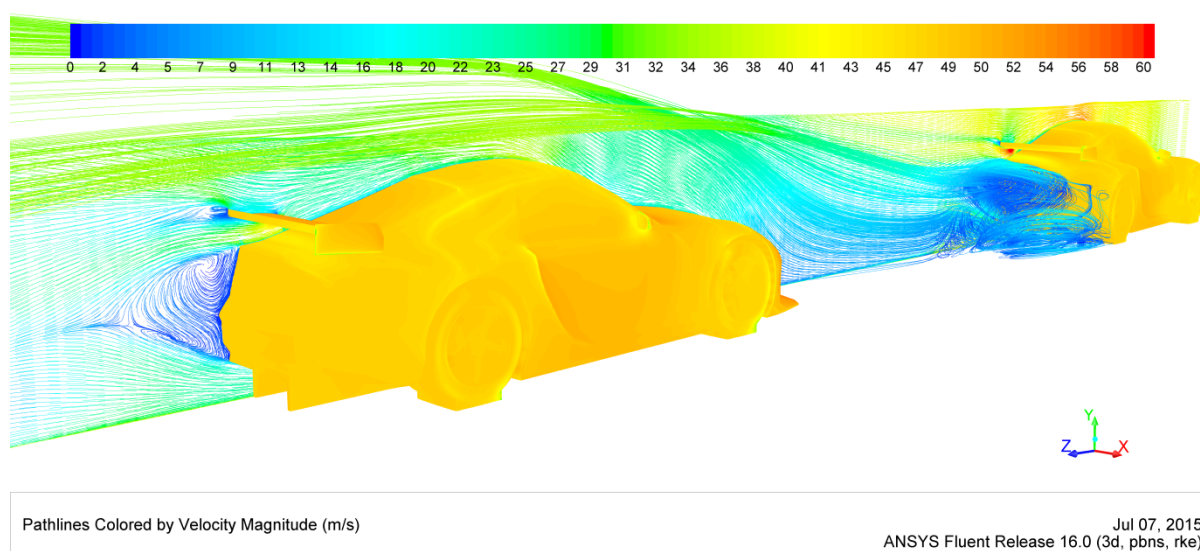
U nastavku će uz pomoć računalne vizualizacije strujanja biti prikazana dva najzanimljivija slučaja međusobnog razmaka:  $x / L = 1$  pri kojem prateće vozilo ima najveći otpor i gubitak negativnog uzgona, te  $x / L = 0.25$  pri kojem prateće vozilo ima drugu najmanju vrijednost otpor ali oba vozila doživljavaju maksimalan gubitak negativnog uzgona na stražnjoj osovini.

#### 7.9.4 Slučaj maksimalnog otpora i pada negativnog uzgona pratećeg vozila

Spomenuto povećanje otpora i pad negativnog uzgona događa se pri međusobnom razmaku vozila  $x / L = 1$ . Opažanjem strujanja u ravnini simetrije vozila (Slika 114.) vidljivo je da strujanje u području krila pratećeg vozila ima znatno manju brzinu nego što je to na vodećem modelu. Također, strujanje preko krova nema očekivano ubrzanje tipično za to mjesto dok se ispred pratećeg modela pojavljuje veliko polje niske brzine i tlaka. Puštanjem strujnica sa stražnjih površina vodećeg modela dobiva se potpunija ideja o strukturi strujanja (Slika 115). Vidljivo je da prateći model zapravo nije potpuno uronjen u niskotlačno područje iza vodećeg modela, već da ga strujnice uzlazno obilaze.



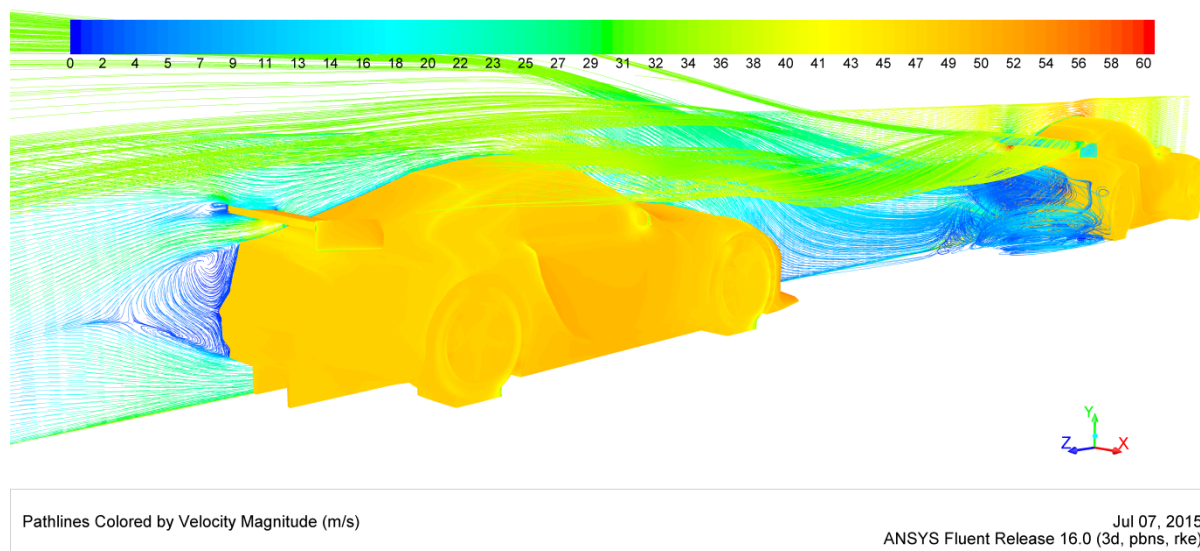
Slika 114. Strujnice brzine u ravnini simetrije za  $x / L = 1$



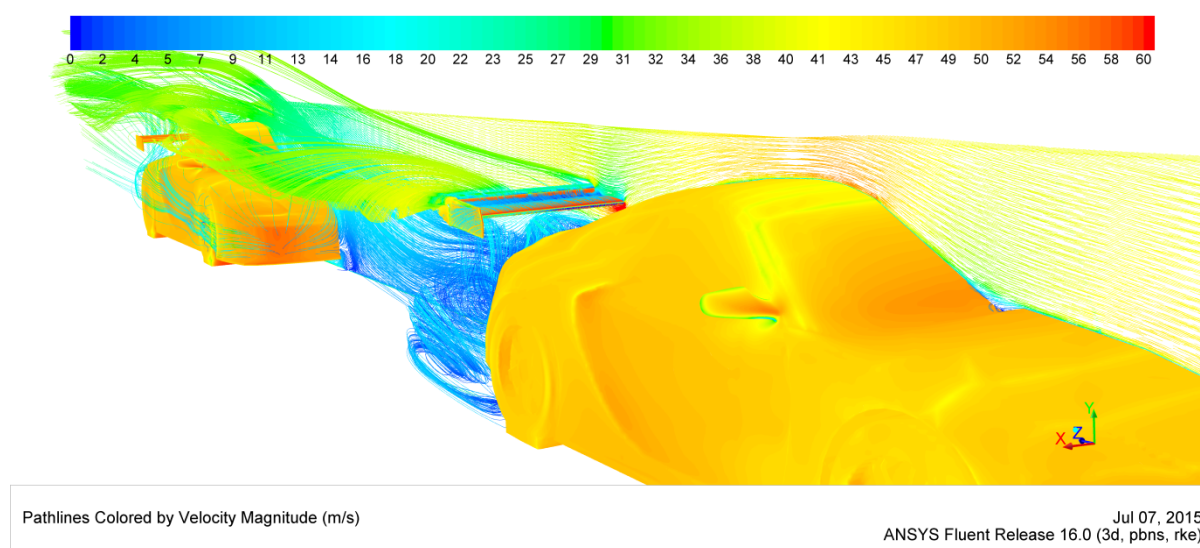
Slika 115. Strujnice s polazištem na stražnjem dijelu vodećeg vozila

Puštanjem dodatnih strujnica sa površina krila vodećeg modela (Slika 116.), vidljivo je da središnji dio pratećeg modela i njegovo krilo svoje strujanje dobivaju iz turbulentnog zraka koji se odvaja s krila vodećeg modela, što objašnjava smanjenu brzinu strujanja u području krila pratećeg modela. Pogled sprijeda na područje između vozila s dodanim strujnicama iz prednjeg odbojnika pratećeg modela dodatno objašnjava uzrok povećanja otpora pratećeg modela na maksimalnu vrijednost. Točka stagnacije na pratećem modelu pomaknuta je prema van (udesno) i ukazuje na činjenicu da je prateći model točno na

udaljenosti pri kojoj još uvijek ne može iskoristiti "pramčani" tlačni val koji stvara vodeći model i uroniti u područje nižeg tlaka, već napajanje strujanja dolazi iz bočnog smjera većom brzinom i udara u prednji odbojnik, haubu i blatobran vozila (Slika 117).



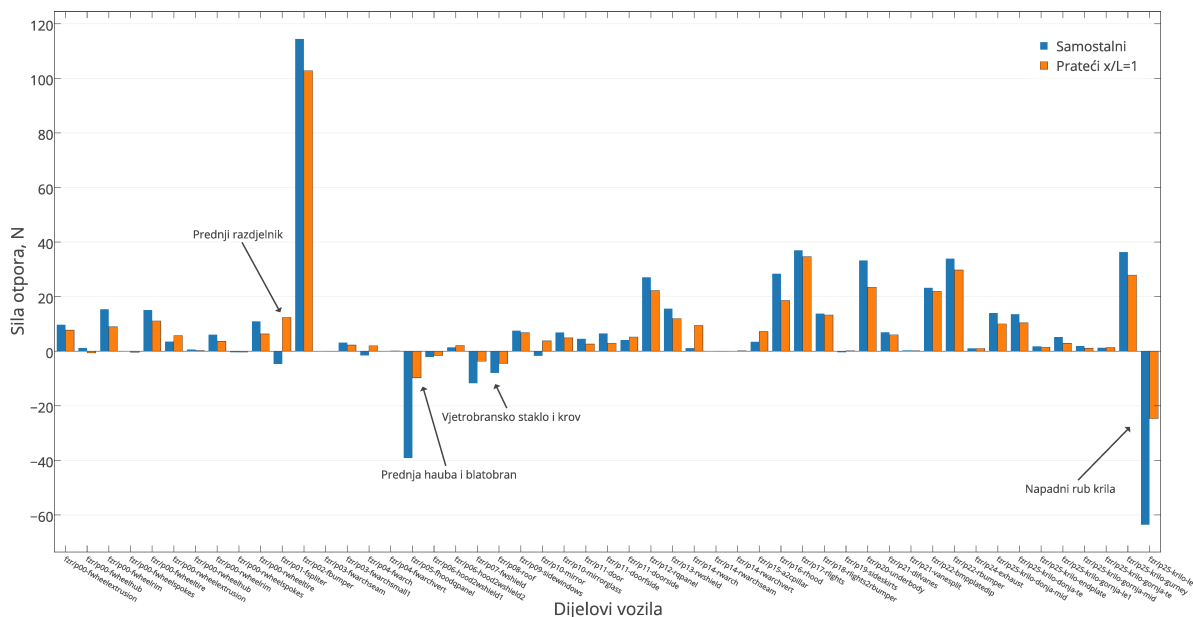
Slika 116. Dodatne strujnice brzine s polazištem na krilu vodećeg modela



Slika 117. Pogled sprijeda s dodatnim strujnicama s prednjeg odbojnika pratećeg modela

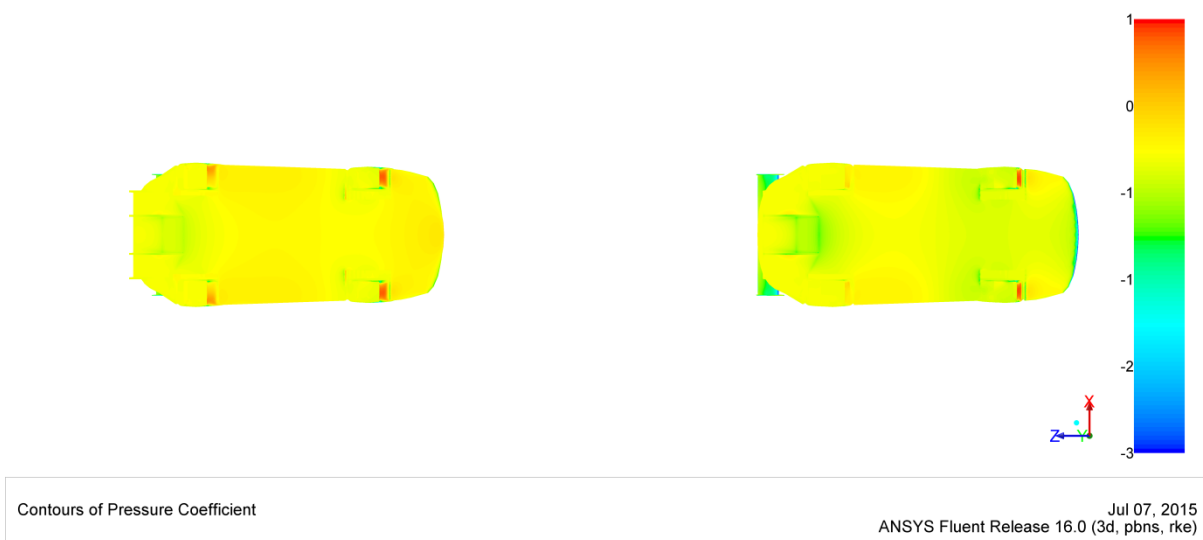
Dijagram raspodjele sile otpora po površinama vozila za slučaj pratećeg vozila pri razmaku  $x / L = 1$  i samostalnog vozila (Slika 118.) potvrđuje pretpostavke iz opažanja. Vidljivo je da su glavni sudionici u povećanju sile otpora prednji dijelovi vozila te krilo koje na svom napadnom rubu zbog usporenog strujanja više ne uspijeva postići visoke

za samostalno vozilo).

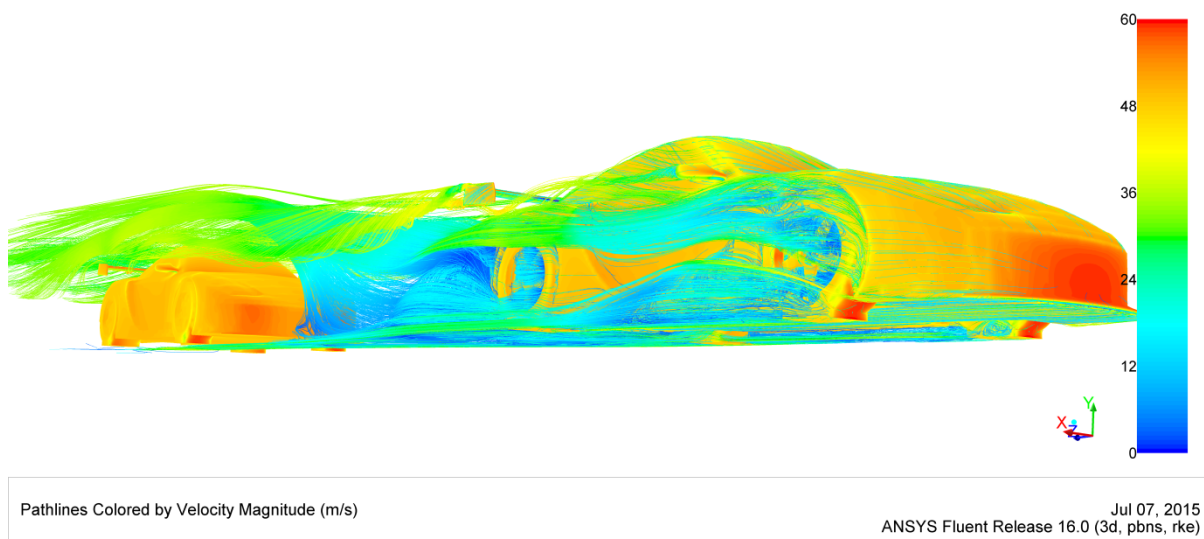


Slika 118. Raspodjela sile otpora po površinama vozila za samostalno i prateće vozilo pri  $x / L = 1$

Pogledom na podnice i krila vodećeg i pratećeg vozila vidljivi su izvori gubitka negativnog uzgona. Iz kontura koeficijenta tlaka na podnicama vozila može se primijetiti da prateće vozilo ima znatno više vrijednosti tlaka što za sobom povlači smanjenje negativnog uzgona. Razlog ovome je bježanje većine strujanja preko pratećeg modela zbog *upwash*-a krila vodećeg modela na ovom razmaku vozila (Slika 120).

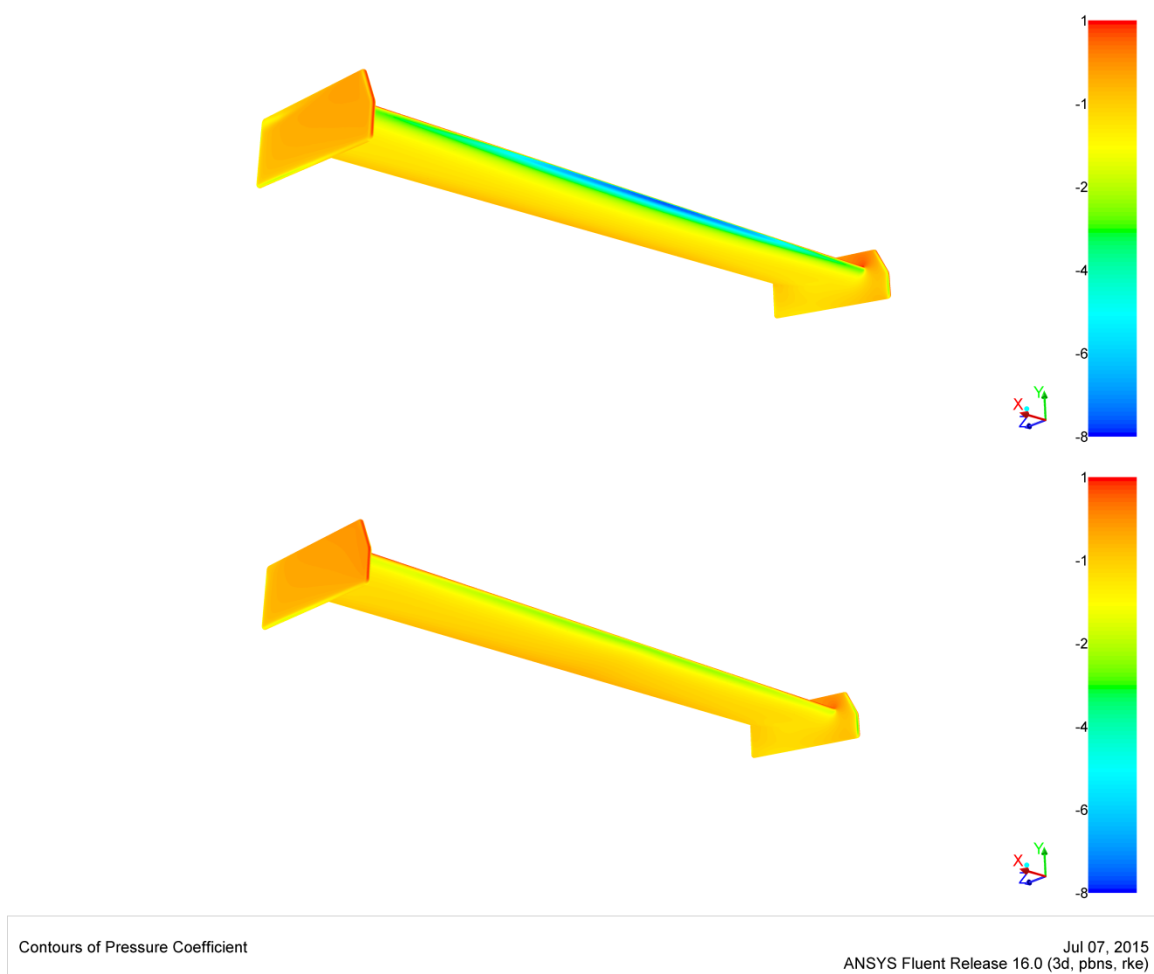


Slika 119. Konture koeficijenta tlaka na podnicama vozila



Slika 120. Strujnice brzine sa svih površina vodećeg modela

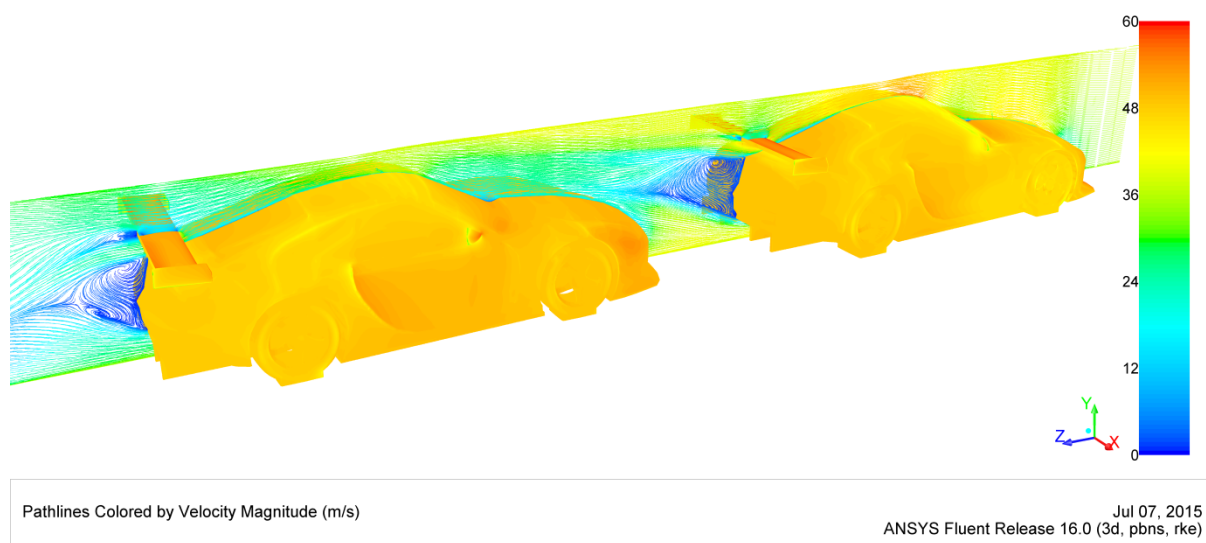
Pogled na donje površine krila vodećeg i pratećeg modela potvrđuje pogoršano napajanje krila pratećeg modela neporemećenim strujanjem (Slika 121).



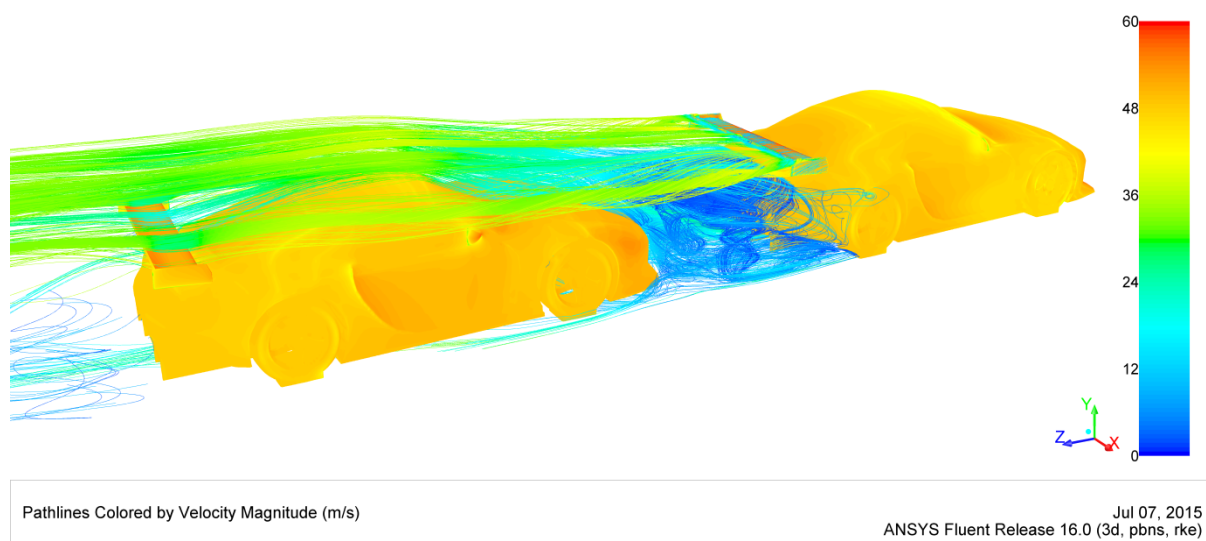
Slika 121. Konture koeficijenta tlaka na krilu vodećeg (gore) i pratećeg (dolje) modela

### 7.9.5 Slučaj minimalnog otpora pratećeg vozila

Za međusobni razmak  $x / L = 0.25$  prateći model ima 13% smanjenje sile otpora (u usporedbi s 16,7% smanjenjem pri  $x / L = 0.125$ ) ali i najveće smanjenje stražnjeg negativnog uzgona od 294 točke. Slika 122. prikazuje strujnice brzine u ravnini simetrije te je iz nje vidljivo da je u usporedbi sa strujanjem na Slika 114. prateći model sada potpuno uronjen u aerodinamički trag vodećeg modela te ga obuhvaća njegov pramčani tlačni val što objašnjava smanjenje sile otpora.

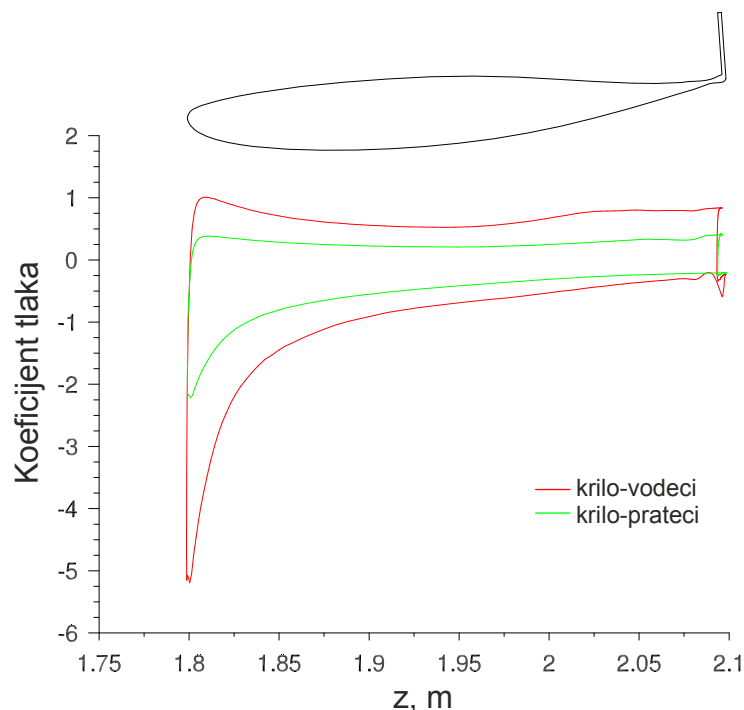


Slika 122. Strujnice brzine u ravnini simetrije pri  $x / L = 0.25$



Slika 123. Izvor napajanja krila pratećeg vozila

Pogledom na Slika 123. može se vidjeti da je krilo pratećeg vozila napajano skoro isključivo strujanjem koje dolazi s krila vodećeg modela, što objašnjava maksimalni gubitak stražnjeg negativnog uzgona karakterističnog za ovaj slučaj. Opažanje potvrđuje i dijagram raspodjele koeficijenta tlaka u ravnini simetrije krila prikazan na Slika 124. Na istome se može primijetiti da obje površine pratećeg krila gube na efikasnosti, što se očituje smanjenjem površine unutar krivulje prikazane na dijagramu.



Slika 124. Raspodjela koeficijenta tlaka u ravnini simetrija krila

Sve navedeno i prikazano objašnjava prirodu strujanja za slučaj međusobnog razmaka vozila  $x / L = 0.25$ .

## 8 Zaključak i preporuke

Glavni cilj ovog rada bio je istražiti utjecaj međusobnog razmaka dvaju GT automobila na aerodinamičke sile koje na njih djeluju. U tu svrhu napravljeno je istraživanje postojeće literature, validacija metoda izrade mreža i pristupa numeričkoj simulaciji na dostupnim eksperimentalnim podacima te primjena spomenutih metoda na GT modele vozila.

Početna intuitivna pretpostavka da će prateće vozilo osjećati pad u aerodinamičkoj sili otpora sa smanjenjem međusobnog razmaka između vozila ispostavila se samo djelomično točnoj te je pronađena kompleksnija zavisnost sile otpora i razmaka vozila. Pretpostavka o gubitku sile negativnog uzgona na stražnjem kraju vodećeg vozila te pratećem vozilu bila je točna i dokazana je rezultatima prikazanim u radu.

Zbog nestacionarne prirode turbulentnog strujanja u prirodi valjalo bi opseg rada proširiti na točnije modele turbulencije (Reynolds Stress Model, LES, SAS) i nestacionarni proračun. U opsegu ovog rada korišten je ostvarivi  $k - \varepsilon$  model turbulencije zbog njegove jednostavnosti, ekstenzivne validacije na eksperimentima te ograničenja računalnih resursa i vremena računanja.

Jedno od pojednostavljenja korištenih pri izradi ovog rada bilo je i zanemarenje strujanja kroz vozilo te utjecaj usisa i ispuha motora koji pri punim opterećenjima i visokim brzinama vrtnje itekako utječu na strujanje oko vozila. Stoga, korištena pojednostavljenja trebalo bi obuhvatiti u nastavku istraživanja.

Također, gibanje vozila jedno iza drugoga samo je prvi korak u manevrima preticanja koji su od iznimne važnosti u svijetu natjecateljskog automobilizma. Analiza svih faza preticanja omogućila bi kvalitetniji uvid u raspodjele bočnih sila pri lateralnom *offsetu* automobila, paralelnoj vožnji i skretanju. Ovakvo istraživanje moralo bi se vršiti bez korištenja uvjeta simetrije koji je korišten u ovom radu te kao takvo iziskuje značajno povećanje računalnih resursa. Ujedno, bilo bi poželjno istražiti aerodinamičke utjecaje zidova i ostalih objekata koji se redovito nalaze u blizini vozila koje se giba po trkaćoj stazi.



## 9 Literatura

- [1] R. Hall, V. Thakker, T. Horan, J. Glazer, and C. Hoene, "Automated Highway System Field Operational Tests for the State of California: Potential Sites, Configurations and Characteristics," California PATH, Research Report UCB-ITS-PRR-97-45, 1997.
- [2] R. M. Pagliarella, S. Watkins, and G. Vino, "A Preliminary Study in the Ahmed Body Far Wake: Bridging the Gap to FGITS," 10th EAEC European Automotive Congress Conference proceeding, 2005.
- [3] R. L. Perry and D. D. Marshall, "An Evaluation of Proposed Formula 1 Aerodynamic Regulations Changes Using CFD," in *26th AIAA Applied Aerodynamics Conference*, Honolulu, 2008.
- [4] S. McBeath, *Competition car aerodynamics*, 2nd ed. United Kingdom: Haynes Publishing, 2011.
- [5] K. G. Götz, "Bewegungssehen und Flugsteuerung bei der Fliege Drosophila," Fischer Stuttgart, BIONA report 2., 1983.
- [6] A. F. Abdel Azim and A. F. Abdel Gawad, "A Flow Visualisation Study of the Aerodynamic Interference between Passenger Cars," SAE Paper 2000-01-0355, 2000.
- [7] L. Tsuei, Ö. Savas, and J. K. Hedrick, "Transient Platoon Aerodynamics during Passing Maneuvers and In-Line Oscillations," University of California, Berkeley, Berkeley, California PATH Research Report UCB-ITS-PRR-2000-26, 2000.
- [8] M. Zabat, S. Frascaroli, and F. K. Browand, "Drag Measurements on 2, 3 and 4 Car Platoons," SAE Paper 940421, 1994.
- [9] S. Watkins and G. Vino, "On Vehicle Spacing and its Effect on Drag and Lift," in *Fifth International Colloquium of Bluff Body Aerodynamics & Applications (BBAA5)*, Ottawa, 2004..
- [10] S. F. Hoerner, *Fluid-Dynamic Drag*, 2nd ed. Bricktown New Jersey, USA: Hoerner Fluid Dynamics, 1965.
- [11] W.-H. Hucho, *Aerodynamics of Road Vehicles*. Hamburg: SAE Books International, 1998.
- [12] C. Smith, *Tune to Win*. Fallbrook, California: Aero Publishers, Inc., 1975.
- [13] J. D. Anderson, *Fundamentals of Aerodynamics*, 3rd ed., M. Lange, Ed. New York, SAD: McGraw-Hill Higher Education, 2001.
- [14] Z. Virag, I. Džijan, and M. Šavar, *Mehanika Fluida - Što valja zapamtiti*. Zagreb, Hrvatska: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2010.

- [15] *Vehicle Aerodynamics Terminology*. Warrendale, SAD: Society of Automotive Engineers, 1976.
- [16] (2011, Nov.) CFD Online. [Online]. [http://www.cfd-online.com/Wiki/Two\\_equation\\_models](http://www.cfd-online.com/Wiki/Two_equation_models)
- [17] I. Džijan and Z. Virag, *Računalna dinamika fluida - predavanja*. Zagreb, Hrvatska: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2010.
- [18] M. Lanfrit, "Best practice guidelines for handling Automotive External Aerodynamics with Fluent," Fluent Deutschland GmbH White Paper, 2005.
- [19] ANSYS, *ANSYS Fluent Theory Guide*. Canonsburg, SAD, 2011.
- [20] S. R. Ahmed, G. Ramm, and G. Faltn, "Some Salient Features Of The Time-Averaged Ground Vehicle Wake," *SAE Technical Paper Series*, no. 840300, pp. 2-31, Mar. 1984.
- [21] ERCOFTAC. (2001) European Research Community on Flow, Turbulence and Combustion. [Online]. [http://www.ercoftac.org/fileadmin/user\\_upload/bigfiles/sig15/database/9.4/index.html](http://www.ercoftac.org/fileadmin/user_upload/bigfiles/sig15/database/9.4/index.html)
- [22] G. Vino, S. Watkins, P. Mousley, J. Watmuff, and S. Prasad, "The Unsteady Near-Wake of a Simplified Passenger Car," in *15th Australasian Fluid Mechanics Conference*, Sydney, 2004.
- [23] J. Hunt, A. Wray, and P. Moin, "Eddies, stream, and convergence zones in turbulent flows," Center for Turbulence Research CTR-S88, 1988.
- [24] W. Meile, G. Brenn, A. Reppenhagen, B. Lechner, and A. Fuchs, "Experiments and numerical simulations on the aerodynamics of the Ahmed body," *CFD Letters*, vol. 3, no. 1, pp. 32-29, Mar. 2011.
- [25] P. Marques-Bruna and P. Grimshaw, "Design of the Grand Touring Sports Car Wing," in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology 2011*, London, 2011, pp. 22-31.
- [26] B. Liebeck, "On the design of subsonic airfoils for high lift," *AIAA Journal*, no. 76-406, 1976.
- [27] M. Schatz, B. Gunther, and F. Thiele, "Computational Modeling of the Unsteady Wake Behind Gurney Flaps," *AIAA Journal* 2417, 2004.
- [28] (2012, Aug.) Wikipedia. [Online]. [http://en.wikipedia.org/wiki/Jakob\\_Ackeret](http://en.wikipedia.org/wiki/Jakob_Ackeret)
- [29] J. Jeong and F. Hussain, "On the identification of a vortex," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 285, pp. 69-94.